

## Studi Awal Fabrikasi Sel Surya Murah Menggunakan $\text{TiO}_2$ Sebagai Material Penyerap Foton dengan Deposisi Ion-Ion NaCl

Dui Yanto Rahman<sup>1✉</sup>, Rita Sulistyowati<sup>2</sup>, Rahmawati Munir<sup>3</sup>, Desyana Olenka Margareta<sup>4</sup>, dan Fisca Dian Utami<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas PGRI Palembang

<sup>2</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas FKIP Universitas PGRI Palembang

<sup>3</sup>Program Studi Fisika, Fakultas MIPA Universitas Mulawarman

<sup>4</sup>Tadris Fisika, UIN Sayyid Ali Rahmatullah

<sup>5</sup>Departemen Fisika Institut Teknologi Bandung

### Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima:  
19 November 2021

Disetujui:  
21 Juli 2022

Dipublikasikan:  
28 Juli 2022

*Keywords:*  
*TiO<sub>2</sub>, NaCl, Fluorine*  
*Tin Oxide, Polymer*  
*Electrolyte,*  
*Efficiency*

### ABSTRAK

Deposisi partikel tembaga sebagai jembatan elektron bagi sel surya berbasis  $\text{TiO}_2$  masih meninggalkan permasalahan berupa tidak sederhana dan efektifnya metode yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengganti deposisi partikel tembaga yang menggunakan metode elektroplating dengan deposisi ion NaCl. Sel surya berbasis  $\text{TiO}_2$  telah difabrikasi dengan deposisi ion NaCl di antara partikel  $\text{TiO}_2$ . Ion dideposisikan dengan mendispersikan NaCl dalam air sebelum dimasukkan serbuk  $\text{TiO}_2$ . Larutan tersebut kemudian dideposisikan di atas substrat *Fluorine Tin Oxide* (FTO) menggunakan metode tetesan (*droplet*) disertai pemanasan dengan suhu  $200^\circ\text{C}$  selama satu jam. Kandungan NaCl divariasikan dari 1-9 % relatif terhadap  $\text{TiO}_2$ . Keberadaan ion di antara partikel penyerap foton dapat meningkatkan efisiensi sel surya dari 0.04% untuk kandungan NaCl sebesar 1% sampai mencapai titik optimum 0.73% untuk kandungan NaCl sebesar 7%. Kandungan NaCl di atas 7 % menyebabkan efisiensi sel surya kembali turun.

### ABSTRACT

*The deposition of copper particles as an electron bridge for  $\text{TiO}_2$ -based solar cells still leaves a problem in the form of not simple and effective methods used. This study aims to replace the deposition of copper particles using the electroplating method with the deposition of NaCl ions.  $\text{TiO}_2$ -based solar has been successfully carried out by depositing NaCl ions between  $\text{TiO}_2$  particles. The ions were deposited by dispersing NaCl in water before adding  $\text{TiO}_2$  powder. The solution was then deposited on a Fluorine Tin Oxide (FTO) substrate using the droplet method accompanied by heating at  $200^\circ\text{C}$  for one hour. NaCl content was varied from 1-9% relative to the  $\text{TiO}_2$  content. The presence of ions between the photon-absorbing particles could increase the efficiency of solar cells from 0.04% for 1% NaCl content to an optimum point of 0.73% for 7% NaCl content. NaCl content above 7% causes the efficiency of solar cells to fall again.*

© 2022 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:  
Program Studi Fisika, Universitas PGRI Palembang  
E-mail: duiyantorahmanmsi@gmail.com

## PENDAHULUAN

Sel surya sebagai sebuah energi terbarukan dapat menjadi energi alternatif dalam mengatasi permasalahan energi yang banyak bersandar pada energi fosil yang sangat terbatas ketersediaannya. Di samping jumlahnya yang melimpah, energi ini juga menjadi solusi bagi permasalahan pemanasan global efek dari polusi karbon dioksida yang dihasilkan oleh sumber energi fosil, batubara, dan gas alam (Shahsavari dan Akbari, 2018). Sel surya yang sudah dikembangkan pada saat ini baik sel surya generasi I, II dan III yaitu sel surya silikon, sel surya film tipis, sel surya organik maupun sel surya DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*) masih memiliki permasalahan berupa mahal material yang digunakan dan metode fabrikasi yang tidak mudah (Mozaffari dkk, 2017; Chang dkk., 2018). Untuk dapat menggantikan sumber energi fosil yang masih mendominasi energi dunia (Sachs, dkk., 2019), sel surya harus terus dikembangkan menggunakan metode fabrikasi yang lebih mudah dan material yang lebih murah.

Sebagai salah satu solusi bagi permasalahan tersebut, sel surya berbasis *Titanium Dioksida*  $\text{TiO}_2$  atau Titania telah dikembangkan. Sel surya ini menggunakan  $\text{TiO}_2$  teknis sebagai material utama penyerap foton, elektrolit polimer komposit Poly Vinyl Alcohol-Litium Hidroksida (PVA-LiOH) sebagai media transpor *hole* menuju elektroda belakang, *Fluorine Tin Oxide* (FTO) sebagai elektroda depan dan aluminium sebagai *counter* elektroda (elektroda belakang) (Saehana dkk., 2012).  $\text{TiO}_2$  sebagai material semikonduktor yang juga dapat digunakan sebagai material utama dalam fotokatalis (Sutisna dkk., 2017; Utami dkk., 2019; Utami dkk., 2019) dan anti bakteri (Margareta dkk., 2019) terbukti mampu menggantikan material utama penyerap foton pada sel surya generasi I, II dan III dengan dihasilkannya konversi cahaya menjadi arus listrik pada struktur sel surya ini. (Saehana dkk., 2012). Selain itu, sel surya jenis ini juga menggunakan material yang murah dalam setiap lapisannya dan metode yang mudah dalam proses fabrikasinya.

Namun demikian, sel surya ini masih memiliki kelemahan yaitu masih kecilnya efisiensi yang dihasilkan dan belum bisa menyaingi sel surya yang sudah ada terutama sel surya silikon. Hal ini disebabkan besarnya rekombinasi elektron-*hole* setelah proses eksitasi dan lemahnya absorpsi material ini karena hanya mampu menyerap spektrum cahaya ultraviolet (Saehana dkk., 2012). Permasalahan ini sudah diantisipasi dengan penggunaan material berbasis karbon mendampingi  $\text{TiO}_2$  yang bertujuan untuk meningkatkan absorpsi sekaligus efisiensi sel surya ini (Rahman dkk., 2016, 2020, 2021). Untuk mengurangi peristiwa rekombinasi elektron dan *hole*, telah dilakukan deposisi partikel tembaga yang berfungsi untuk melakukan *trapping* elektron, menggunakan proses elektroplating dalam struktur sel surya ini (Saehana dkk., 2012; Rokhmat dkk., 2017).

Walaupun deposisi partikel tembaga telah dilakukan menggunakan metode yang mudah, proses ini masih menyisakan beberapa permasalahan yaitu ; mudahnya partikel film  $\text{TiO}_2$  terlepas ketika proses elektroplating di dalam larutan Tembaga Sulfat  $\text{CuSO}_4$ . Selain itu, deposisi partikel tembaga dengan metode elektroplating mengakibatkan penumpukan kluster tembaga yang berefek pada terhalangnya cahaya menuju partikel penyerap cahaya  $\text{TiO}_2$ , dan hanya berfungsi untuk meningkatkan arus elektron menuju elektroda depan (Rokhmat dkk., 2017). Untuk dapat meningkatkan efisiensi sel surya lebih baik, aliran *hole* menuju *Counter* elektroda juga harus cepat (Liu dkk., 2019). Sehingga proses rekombinasi elektron dan *hole* dapat dikurangi dengan lebih efisien. Penempatan polimer elektrolit berbentuk gel sebagai media transpor *hole* dalam sel surya ini juga hanya menyentuh bagian luar dari film  $\text{TiO}_2$ , sehingga masih banyak *hole* di bagian dalam film  $\text{TiO}_2$  yang tidak terjangkau dan ditangkap untuk dialirkan menuju elektrolit polimer dan *counter* elektroda (Rahman dkk., 2016).

Untuk memecahkan permasalahan-permasalahan tersebut, di dalam penelitian ini, akan dilakukan deposisi material ionik di dalam film  $\text{TiO}_2$ . Material ini akan berfungsi untuk menangkap elektron dan *hole* secara bersamaan dalam film  $\text{TiO}_2$  dan mencegah keduanya berekombinasi secara

lebih efisien. Deposisi material ionik sudah pernah dilakukan dalam penelitian fotokatalis dan berhasil difungsikan untuk mengurangi rekombinasi elektron dan *hole* (Feng dkk., 2012, Kajitvichyanukul dkk, 2006; Litter dkk., 1999). Untuk aplikasi sel surya, khususnya yang menggunakan TiO<sub>2</sub> sebagai material penyerap foton, deposisi material ionik belum pernah dilakukan. Sayangnya, penempatan material ionik dalam fotokatalis umumnya menggunakan material yang mahal dan metode yang sulit (Al-Azri dkk., 2019). Sebagai alternatif, dalam penelitian ini digunakan material ionik dari garam dapur (NaCl) yang murah dan mudah didapatkan. NaCl ini akan dilarutkan terlebih dahulu di dalam air sebelum dimasukkan serbuk TiO<sub>2</sub>. Melalui metode ini material ionik akan dapat tersebar merata dan menempel di partikel-partikel TiO<sub>2</sub> ketika proses pemanasan film TiO<sub>2</sub>. Deposisi ion-ion secara merata di antara partikel-partikel TiO<sub>2</sub> dapat menjadi solusi bagi penumpukan partikel tembaga yang dideposisikan secara elektropalting. Keberadaan material ionik ini diharapkan dapat mengurangi rekombinasi elektron dan *hole*, serta meningkatkan efisiensi sel surya ini. Apabila ini berhasil dilakukan, maka akan dapat menggantikan fungsi partikel tembaga yang dideposisikan metode elektroplating, dan menjadi keterbaruan dalam penelitian ini.

## METODE

Pertama-tama, kaca *fluorine doped tin oxide* (FTO) (Solaronix, Switzerland) terlebih dahulu direndam dalam cairan etanol 90% (Sakura, Indonesia). Setelah itu, FTO dipanaskan di atas *hotplate* dengan suhu 200°C selama 20 menit. Selanjutnya, serbuk NaCl diaduk menggunakan pengaduk magnetik di dalam 12 mL air aquades selama 15 menit. Kemudian 5 g serbuk TiO<sub>2</sub> (technical grade, Bratachem, Indonesia) dimasukkan ke dalam larutan NaCl tersebut dan diaduk selama 30 menit sampai terbentuk suspensi. Jumlah kandungan NaCl terhadap kandungan TiO<sub>2</sub> akan divariasikan untuk mendapatkan nilai optimum. Kemudian, sebanyak 1 mL dari suspensi tersebut kemudian dituangkan di atas FTO yang dipanaskan tadi menggunakan spatula kecil dan terus dipanaskan selama satu jam untuk menguapkan air yang terkandung dalam suspensi tersebut dan pada akhirnya akan terbentuk film TiO<sub>2</sub>. Di tempat terpisah, pembuatan elektrolit polimer dilakukan dengan melarutkan sebanyak 0,18 g LiOH (Kanto, Jepang) di dalam 20 mL air aquades. Kemudian 1,8 g Polyvinyl alcohol (PVA) (Bratachem, Indonesia) ditambahkan dalam larutan tersebut dan dipanaskan pada suhu 75°C selama 60 menit sampai menghasilkan elektrolit polimer berbentuk gel.

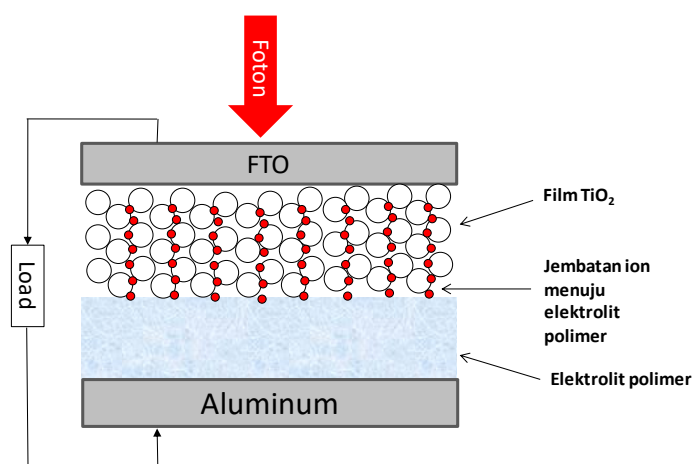
Elektrolit polimer yang sudah berbentuk gel tersebut dioleskan di atas film TiO<sub>2</sub> secara merata. Selanjutnya, lembaran aluminium diletakkan di atas film TiO<sub>2</sub> yang sudah diolesi elektrolit polimer tersebut dan dijepit dengan alat penjepit. Modul surya ini kemudian dikarakterisasi I-V menggunakan perangkat Keitley 617 dibawah penyinaran lampu Xenon. Pengukuran intensitas penyinaran dilakukan menggunakan Newport Power/Energy Meter Model 841-PE. Skema sel surya dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 1 di bawah ini.

Efisiensi ( $\eta$ ) dan *fill factor* sel surya dihitung berdasarkan Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2)$$

dimana  $I_{sc}$  adalah arus hubungan singkat (*Short Circuit*),  $V_{oc}$  adalah tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit*),  $FF$  adalah *Fill Factor*,  $P_{in}$  adalah daya cahaya,  $I_m$  dan  $V_m$  adalah arus dan tegangan yang menghasilkan daya maksimum.



Gambar 1. Diagram skema sel surya yang diteliti.

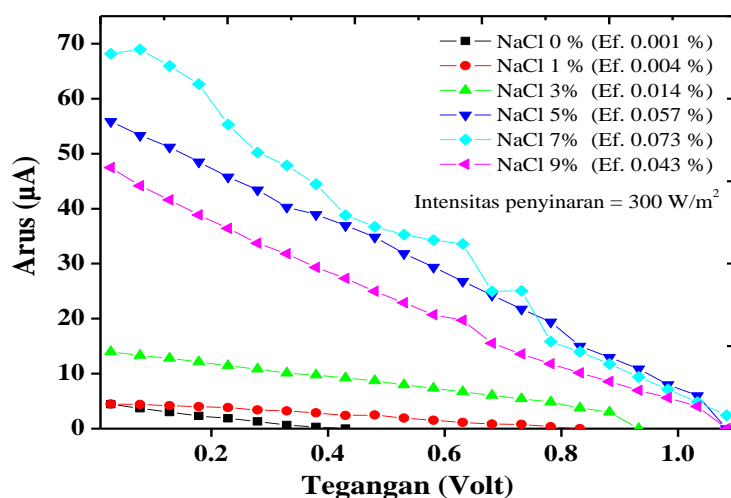
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada studi awal ini, karakterisasi yang dilakukan hanya menggunakan I-V meter. Hal ini bertujuan untuk mengetahui lebih awal apakah struktur sel surya berbasis  $\text{TiO}_2$  yang dideposisikan ion-ion NaCl dapat berfungsi dengan baik. Ini dapat diketahui dengan dihasilkannya kurva I-V ketika modul sel surya ini disinari cahaya. Hal ini menunjukkan bahwa struktur sel surya ini dapat menghasilkan arus dan tegangan, yang merupakan ciri utama divais sel surya.

Pengaruh deposisi ion-ion NaCl di antara partikel penyerap foton  $\text{TiO}_2$  dapat langsung diketahui melalui Gambar 2 dan Tabel 1 yang menggambarkan kinerja sel surya  $\text{TiO}_2$  dengan parameter arus  $I_{sc}$  dan tegangan  $V_{oc}$  yang dihasilkan. Efisiensi sel surya mulai naik ketika ion-ion NaCl dideposisikan di antara partikel-partikel  $\text{TiO}_2$ . Ini terlihat dengan jelas ketika efisiensi mulai naik dari 0,001% pada saat  $\text{TiO}_2$  belum dimasukkan ion-ion NaCl menjadi 0,004% ketika ion-ion NaCl sudah dideposisikan. Efisiensi sel surya semakin naik menjadi 0,014%, 0,057% dan 0,073% seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaCl sebesar 3%, 5% dan 7%. Efisiensi sel surya kembali turun setelah konsentrasi NaCl lebih dari 7%.

Kenaikan efisiensi sel surya disebabkan adanya kenaikan arus  $I_{sc}$  dan tegangan  $V_{oc}$  yaitu menjadi sebesar 4,50  $\mu\text{A}$ ; 13,96  $\mu\text{A}$ ; 55,85  $\mu\text{A}$ ; 68,15  $\mu\text{A}$  dan 0,83 V; 0,93 V; 1,08 V; 1,13 V dari arus 4,40  $\mu\text{A}$  dan tegangan 0,43 V ketika suspensi  $\text{TiO}_2$  belum dideposisikan ion-ion NaCl. Arus  $I_{sc}$  dan tegangan  $V_{oc}$  kembali turun menjadi 47,47  $\mu\text{A}$  dan 1,08 V ketika konsentrasi NaCl 9%.

Kenaikan arus dan tegangan ini sangat mungkin disebabkan oleh peran-peran dari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  dalam proses trapping baik elektron maupun hole yang tercipta setelah terjadi eksitasi elektron akibat proses penyinaran cahaya. Ion  $\text{Na}^+$  berfungsi untuk menangkap elektron karena ion ini kekurangan elektron, sedangkan ion  $\text{Cl}^-$ , karena kekurangan muatan positif, berperan menangkap hole. Sehingga proses rekombinasi elektron dan hole dapat dikurangi lebih efisien melalui proses trapping elektron dan hole ini.



Gambar 2. Karakteristik I-V sel surya TiO<sub>2</sub> dengan variasi kandungan NaCl.

Menurunnya kembali efisiensi sel surya ketika konsentrasi NaCl di atas 7 % sangat mungkin disebabkan oleh keberadaan ion-ion yang sudah terlalu banyak sehingga menutupi partikel-partikel TiO<sub>2</sub> yang berfungsi menyerap foton. Hal ini secara jelas dapat dilihat dengan menurunnya arus yang dihasilkan ketika konsentrasi NaCl 9%, yaitu turun dari 68,15  $\mu\text{A}$  ketika konsentrasi NaCl 7% menjadi 47,47  $\mu\text{A}$  ketika konsentrasi NaCl 9%. Turunnya arus yang dihasilkan disebabkan oleh semakin menurunnya penyerapan foton oleh partikel-partikel TiO<sub>2</sub>. Penurunan serapan foton berefek pada semakin kecilnya pasangan elektron dan *hole* yang dihasilkan. Hal yang sama juga terjadi pada saat partikel-partikel TiO<sub>2</sub> dideposisikan partikel tembaga (Cu) dengan metode elektroplating (Mamat dkk., 2017). Efisiensi sel surya semakin naik ketika konsentrasi partikel (Cu) semakin bertambah dan mencapai titik optimum ketika konsentrasi Cu 8,79%. Efisiensi kembali turun ketika konsentrasi Cu di atas 8,79% (Mamat dkk., 2017). Doping material semikonduktor ZnO dengan Au juga menghasilkan efisiensi maksimum ketika konsentrasi Au berada pada kisaran 6-8% (Bora dkk., 2011).

Arus  $I_{sc}$  yang dihasilkan sel surya dengan struktur ini masih dalam kisaran mikroampere. Ini disebabkan karena material semikonduktor TiO<sub>2</sub> memiliki *bandgap* yang cukup besar yaitu 3,2 eV, yang hanya mampu menyerap cahaya pada area cahaya ultraviolet dengan panjang gelombang maksimum 400 nm (Saehana dkk., 2017). Pendampingan material TiO<sub>2</sub> dengan material yang memiliki *bandgap* kecil dapat meningkatkan serapan cahaya memasuki area cahaya tampak yang berefek pada peningkatan arus  $I_{sc}$  yang dihasilkan (Rahman dkk., 2016).

Walaupun demikian, tegangan  $V_{oc}$  yang dihasilkan oleh struktur sel surya ini cukup besar, yaitu 1,13 V. Naiknya tegangan  $V_{oc}$  bersamaan dengan deposisi ion-ion NaCl disebabkan oleh semakin lamanya *lifetime* pasangan elektron dan *hole* (Matsui dkk., 2004). Sebagaimana diketahui *lifetime* dari pasangan elektron dan *hole* hanya dalam beberapa *nanosecond* saja (Proctor dkk., 2013). Keberadaan ion-ion Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> dapat memperpanjang *lifetime* pasangan elektron dan *hole* melalui proses *trapping* elektron dan *hole*.

Sebagai perbandingan, dalam proses fotokatalis yang umumnya juga menggunakan TiO<sub>2</sub>, beberapa peneliti telah berhasil meningkatkan efisiensi fotokatalis menggunakan ion-ion logam transisi. Choi dkk., berhasil menggunakan ion sebagai penangkap elektron atau *hole* dalam proses fotokatalis (Kumaravel dkk., 2019; Guayaquil dkk., 2017 ; Choi dkk., 1994). Keberadaan ion-ion tersebut berfungsi untuk memperpanjang *lifetime* dari pembawa muatan sehingga dapat

meningkatkan aktifitas fotokatalis. Ion-ion logam transisi dari Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn juga telah berhasil dideposisikan dalam partikel TiO<sub>2</sub> dan berhasil meningkatkan efisiensi fotokatalis dari proses degradasi AB92 secara signifikan yang disebabkan oleh peningkatan penyerapan cahaya menuju area cahaya tampak (Stojadinović dkk., 2022 Valero dkk, 2019; ; Ghasemi dkk., 2009). Ion-ion logam transisi W<sup>6+</sup>, V<sup>5+</sup>, Fe<sup>3+</sup> dan Cu<sup>2+</sup> dilaporkan juga telah berhasil meningkatkan efisiensi fotokatalis TiO<sub>2</sub> (Larumbe dkk., 2015; Guan dkk., 2011; Colon dkk., 2006).

Tabel 1. Parameter-parameter performa sel surya TiO<sub>2</sub> dengan variasi kandungan NaCl dalam film TiO<sub>2</sub>.

Kandungan NaCl (%)	$I_{sc}$ ( $\mu$ A)	$V_{oc}$ (V)	FF	Efisiensi (%)
0	4,40	0,43	0,23	0,001
1	4,50	0,83	0,32	0,004
3	13,96	0,93	0,33	0,014
5	55,85	1,08	0,31	0,057
7	68,15	1,13	0,30	0,073
9	47,47	1,08	0,30	0,043

Perbandingan ini dapat dilakukan dikarenakan prinsip kerja fotokatalis dan sel surya mempunyai kemiripan, yaitu sama-sama berusaha menghasilkan pasangan elektron dan *hole* yang sebanyak-banyaknya dan juga berusaha semaksimal mungkin agar pasangan elektron dan *hole* yang tercipta tidak mudah berekombinasi supaya efisiensi yang dihasilkan dapat semakin meningkat (Bai dkk., 2017). Perbedaannya, pada sel surya, eksitasi elektron diarahkan agar menjadi aliran elektron ke perangkat luar sehingga menghasilkan arus listrik (Marinova dkk., 2017). Sedangkan pada fotokatalis, pasangan elektron dan *hole* yang dihasilkan dimanfaatkan untuk fotodegradasi yang dapat dimanfaatkan untuk penjernihan air limbah (Saravanan dkk., 2017).

Kandungan NaCl dalam suspensi TiO<sub>2</sub> mencapai titik optimum pada konsentrasi 7% dimana efisiensi kembali turun ketika kandungan NaCl di atas 7%. Hal yang sama juga terjadi pada penelitian fotokatalis TiO<sub>2</sub> yang didoping dengan Mn walaupun dengan titik konsentrasi berbeda (Feng dkk., 2012). Efisiensi fotokatalis TiO<sub>2</sub> meningkat ketika konsentrasi Mn naik dan mencapai titik optimum pada konsentrasi 3%. Konsentrasi di atas 3% kembali menurunkan efisiensi fotokatalis (Feng dkk., 2012). Menurunnya efisiensi disebabkan oleh disipasi energi internal dalam ion-ion Mn (Bi dkk., 2021; Xue dkk., 2006).

Efisiensi sel surya dengan struktur ini mempunyai peluang untuk ditingkatkan dengan penggunaan material yang memiliki *bandgap* kecil dan material ionik yang lebih konduktif dari NaCl. Material yang memiliki *bandgap* kecil akan dapat meningkatkan kuat arus  $I_{sc}$  yang masih kecil di struktur sel surya ini. Sedangkan material ionik yang memiliki konduktifitas yang lebih baik akan mampu memperpanjang *lifetime* dari pasangan elektron dan *hole*, yang pada akhirnya akan berpengaruh juga pada peningkatan arus  $I_{sc}$ .

## SIMPULAN

Sel surya berbasis TiO<sub>2</sub> yang disisipkan ion-ion NaCl telah berhasil difabrikasi. Keberadaan ion-ion NaCl telah berhasil meningkatkan efisiensi sel surya berbasis TiO<sub>2</sub> dari 0,001% (tanpa NaCl) menjadi 0,073% ketika kandungan NaCl mencapai titik optimum sebesar 7%. Kandungan NaCl di atas 7% kembali menurunkan kembali efisiensi sel surya. Sel surya ini sangat layak untuk terus dikembangkan dikarenakan penggunaan material murah dan prosed fabrikasi yang mudah.

## REFERENSI

- Al-Azri, Z. H. N., AlOufi, M., Chan, A., Waterhouse, G. I. N., & Idriss, H. (2019). Metal particle size effects on the photocatalytic hydrogen ion reduction. *ACS Catalysis*, *9*(5), 3946-3958.
- Bai, F. Q., Li, W., & Zhang, H. X. (2017). Theoretical studies of titanium dioxide for dye-sensitized solar cell and photocatalytic reaction. *Titanium Dioxide*. 229-248.
- Bi, J., & Cao, X. (2021). Electrochemical Properties and Thin-Film Morphology of Mn-doped TiO<sub>2</sub> Thin Layer Prepared by Electrodeposition Technique and Its application as photocatalyst for Rhodamine B degradation. *International Journal Of Electrochemical Science*, *16*(3).
- Bora, T., Kyaw, H. H., Sarkar, S., Pal, S. K., & Dutta, J. (2011). Highly efficient ZnO/Au Schottky barrier dye-sensitized solar cells: Role of gold nanoparticles on the charge-transfer process. *Beilstein journal of nanotechnology*, *2*(1), 681-690.
- Chang, N. L., Ho-Baillie, A. W. Y., Vak, D., Gao, M., Green, M. A., & Egan, R. J. (2018). Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *174*, 314-324.
- Choi, W.A. Termin, M.R. Hoffmann, Effects of metal-ion dopants on the photocatalytic reactivity of quantum-sized TiO<sub>2</sub> particles, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* *33* (1994) 1091-1096.
- Colon, G., Maicu, M., Hidalgo, M. S., & Navio, J. A. (2006). Cu-doped TiO<sub>2</sub> systems with improved photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, *67*(1-2), 41-51.)
- Feng, H., Zhang, M. H., & Liya, E. Y. (2012). Hydrothermal synthesis and photocatalytic performance of metal-ions doped TiO<sub>2</sub>. *Applied Catalysis A: General*, *413*, 238-244.
- Ghasemi, S., Rahimnejad, S., Setayesh, S. R., Rohani, S., & Gholami, M. R. (2009). Transition metal ions effect on the properties and photocatalytic activity of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> prepared in an ionic liquid. *Journal of hazardous materials*, *172*(2-3), 1573-1578.
- Guan, H. N., Chi, D. F., Yu, J., & Zhang, S. Y. (2011). Novel photodegradable insecticide W/TiO<sub>2</sub>/Avermectin nanocomposites obtained by polyelectrolytes assembly. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *83*(1), 148-154.
- Guayaquil-Sosa, J. F., Serrano-Rosales, B., Valadés-Pelayo, P. J., & de Lasa, H. (2017). Photocatalytic hydrogen production using mesoporous TiO<sub>2</sub> doped with Pt. *Applied Catalysis B: Environmental*, *211*, 337-348.
- Kajitvichyanukul, P. & Sungkaratana, T. (2006). Photocatalytic removal of Zinc (II) in UV-irradiated titania suspensions. *Asian Journal on Energy and Environment*, *7*, 258-265.
- Kumaravel, V., Mathew, S., Bartlett, J., & Pillai, S. C. (2019). Photocatalytic hydrogen production using metal doped TiO<sub>2</sub>: A review of recent advances. *Applied Catalysis B: Environmental*, *244*, 1021-1064.
- Larumbe, S., Monge, M., & Gómez-Polo, C. (2015). Comparative study of (N, Fe) doped TiO<sub>2</sub> photocatalysts. *Applied Surface Science*, *327*, 490-497.
- Litter, M. I. (1999). Heterogeneous photocatalysis: transition metal ions in photocatalytic systems. *Applied Catalysis B: Environmental*, *23*(2-3), 89-114.
- Liu, C., Tu, J., Hu, X., Huang, Z., Meng, X., Yang, J., ... & Chen, Y. (2019). Enhanced hole transportation for inverted tin-based perovskite solar cells with high performance and stability. *Advanced Functional Materials*, *29*(18), 1808059.
- Margaretta, D. O., Permadi, K. W., Rahman, D. Y., Utami, F. D., Viridi, S., & Abdullah, M. (2019, April). Antibacterial Investigation Activity of Titania Anatase technical grade on polypropylene sheet. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1204, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.
- Marinova, N., Valero, S., & Delgado, J. L. (2017). Organic and perovskite solar cells: Working principles, materials and interfaces. *Journal of colloid and interface science*, *488*, 373-389.

- Matsui, H., Okada, K., Kawashima, T., Ezure, T., Tanabe, N., Kawano, R., & Watanabe, M. (2004). Application of an ionic liquid-based electrolyte to a 100mm× 100 mm sized dye-sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164(1-3), 129-135.
- Mozaffari, S., Nateghi, M. R., & Zarandi, M. B. (2017). An overview of the Challenges in the commercialization of dye sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 675-686.
- Proctor, C. M., Kuik, M., & Nguyen, T. Q. (2013). Charge carrier recombination in organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, 38(12), 1941-1960.
- Rahman, D. Y., Rokhmat, M., Yuliza, E., Sustini, E., & Abdullah, M. (2016). New design of potentially low-cost solar cells using TiO<sub>2</sub>/graphite composite as photon absorber. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 7(3), 289-296.
- Rahman, D. Y., Utami, F. D., Amalia, N., Sulistyowati, R., Sustini, E., & Abdullah, M. (2021). Low-cost solar cell using PVA. NaCl polymer electrolyte as hole transport medium and graphite/TiO<sub>2</sub> composite as photon-absorbing materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3301-3304.
- Rahman, D. Y., Utami, F. D., Margaretta, D. O., Amalia, N., Sulistyowati, R., & Abdullah, M. (2020, May). Inexpensive solar cell using TiO<sub>2</sub>/coffee composite as photon absorbing material. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 833, No. 1, p. 012089). IOP Publishing.
- Rokhmat, M., Wibowo, E., & Abdullah, M. (2017). Performance improvement of TiO<sub>2</sub>/CuO solar cell by growing copper particle using fix current electroplating method. *Procedia Engineering*, 170, 72-77.
- Saehana, S., Arifin, P., Khairurrijal, & Abdullah, M. (2012). A new architecture for solar cells involving a metal bridge deposited between active TiO<sub>2</sub> particles. *Journal of Applied Physics*, 111(12), 123109.
- Sachs, J. D., Woo, W. T., Yoshino, N., & Taghizadeh-Hesary, F. (2019). Importance of green finance for achieving sustainable development goals and energy security. *Handbook of green finance: Energy security and sustainable development*, 10, 1-10.
- Saravanan, R., Gracia, F., & Stephen, A. (2017). Basic principles, mechanism, and challenges of photocatalysis. In *Nanocomposites for visible light-induced photocatalysis* (pp. 19-40). Springer, Cham.
- Shahsavari, A., & Akbari, M. (2018). Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 275-291.
- Stojadinović, S., Radić, N., Vasilić, R., Tadić, N., & Tsanev, A. (2022). Photocatalytic degradation of methyl orange in the presence of transition metals (Mn, Ni, Co) modified TiO<sub>2</sub> coatings formed by plasma electrolytic oxidation. *Solid State Sciences*, 106896.
- Sutisna, Wibowo, E., Rokhmat, M., Rahman, D. Y., Murniati, R., & Abdullah, M. (2017). Batik Wastewater Treatment Using TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Coated on the Surface of Plastic Sheet. *Procedia engineering*, 170, 78-83.
- Utami, F. D., Rahman, D. Y., Margareta, D. O., & Abdullah, M. (2019, April). Photocatalyst based on TiO<sub>2</sub> and its application in organic wastewater treatment using simple spray method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1204, No. 1, p. 012086). IOP Publishing.
- Utami, F. D., Rahman, D. Y., Margareta, D. O., Rahmayanti, H. D., Munir, R., Sustini, E., & Abdullah, M. (2019, August). TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using Simple Spray Method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 599, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.



- Valero-Romero, M. J., Santaclara, J. G., Oar-Arteta, L., Van Koppen, L., Osadchii, D. Y., Gascon, J., & Kapteijn, F. (2019). Photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> and Fe-doped TiO<sub>2</sub> prepared by metal organic framework-mediated synthesis. *Chemical Engineering Journal*, *360*, 75-88.
- Xue, M., Huang, L., Wang, J. Q., Wang, Y., Gao, L., Zhu, J. H., & Zou, Z. G. (2008). The direct synthesis of mesoporous structured MnO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposite: a novel visible-light active photocatalyst with large pore size. *Nanotechnology*, *19*(18), 185604.
- Zainun, A. R., Tomoya, S., Noor, U. M., Rusop, M., & Masaya, I. (2012). New approach for generating Cu<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> composite films for solar cell applications. *Materials Letters*, *66*(1), 254-256.