

EFEK FOTOKATALISIS NANO TiO₂ TERHADAP MEKANISME ANTIMIKROBIA E COLI DAN SALMONELLA

EFFECT OF PHOTOCATALYST NANO TiO₂ ON ANTIMICROBIAL MECHANISMS E COLI DAN SALMONELLA

Siti Naimah, Rahyani Ermawati

Balai Besar Kimia dan Kemasan Kementerian Perindustrian

ABSTRAK

Fotokatalisis TiO₂ dengan sinar UV dan sinar matahari untuk inaktivasi bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp* telah dilakukan pada model air tercemar yaitu dengan menambahkan bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp* pada air steril. Perbandingan air steril : biakan bakteri pada model air tercemar adalah 99 : 1. Uji kinerja katalis TiO₂ dalam inaktivasi *E-coli* dan *Salmonella sp* dilakukan dalam fotoreaktor *batch* dengan volume 500 ml yang dilengkapi dengan 6 (enam) lampu UV *black light* @10 watt sedangkan penggunaan sinar matahari dilakukan tepat jam 12 siang diharapkan kondisi ini intensitas matahari adalah maksimum. Reaktor dilengkapi dengan pengaduk mekanik. Perubahan inaktivasi *E-coli* dan *Salmonella sp* diamati setelah sampel ditanam dalam media agar yang telah diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan katalis TiO₂ 0,15 g/L dengan sinar UV dalam waktu 10 menit 100% bakteri *E-coli* sudah tidak aktif. Sedangkan dengan sinar matahari kondisi yang sama memerlukan waktu lebih lama sekitar 30 menit. *Salmonella sp* dengan TiO₂ 0,15 g/L dan sinar UV memerlukan waktu lebih lama untuk 100% inaktif yaitu sekitar 60 menit, sedangkan dengan sinar matahari pada waktu yang sama hanya 50% yang inaktif.

Kata kunci: *E coli*, Katalis, Sinar UV, Sinar matahari, Inaktivasi, *E coli*, *Salmonella*

ABSTRACT

The effects of different light on photocatalytic for inactivated of *E-coli* and *Salmonella sp* using TiO₂ particle were studied in a batch photoreactor with several UV lamps (@ 10 watt) volume 500 ml. Reactor was equipped with magnetic stirrer. As a sun light was used at 12 clocks in that time the intensity sun light was maximum. Sterilize water with added by culture bacteria *E-coli* and *Salmonella sp* 99 : 1 were used as a polluted for inactivation *E-coli* and *Salmonella sp* propose. Inactivation of *E-coli* and *Salmonella sp* were identified after the samples were inoculated in the nutrient agar after incubated for 24 hours at 37°C. The results showed that addition of 0.15 g/L TiO₂ catalyst used UV light during 10 minute almost 100% of *E-coli* were inactivated. Furthermore, used sun light was used almost 30 minute. *Salmonella sp* in TiO₂ 0.15 g/L and UV light was inactive almost 60 minutes, then using sun light it only half were inactive.

Keywords: *E-coli*, Catalyst, UV light, Sun light, Inactivation, *E coli*, *Salmonella*

PENDAHULUAN

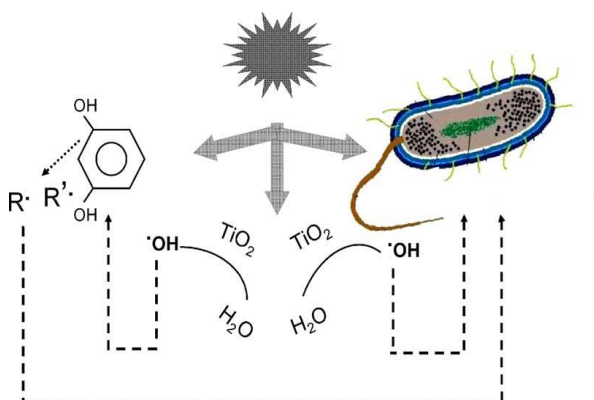
Keadaan dan kecenderungan yang terjadi dalam air bersih khususnya air minum di Indonesia yakni belum terpenuhinya pelayanan air yang bebas dari mikroorganisme serta masih rendahnya cakupan dan tingkat pelayanan air bersih. Saat ini, kualitas air yang dialirkan PDAM hingga sampai pelanggan tidak/belum memenuhi kualitas standar air bersih. Hal ini dikarenakan kurang layak dan kondisi persiapan yang buruk.

Inaktivasi mikroorganisme dalam air selama ini umumnya menggunakan klorin atau ozon, padahal klorin menghasilkan residu dalam air yang bersifat toksik terhadap biota air. Penggunaan klorin yang berlebihan akan menghasilkan produk samping yang bersifat

toksik seperti *trihalomethen* yang bersifat karsinogen [1] yaitu bahan kimia yang diduga menyebabkan sel kanker. Sehingga untuk menghindari penambahan bahan kimia dalam penyediaan air bersih khususnya dalam penyediaan air minum, pada saat ini berkembang penelitian menggunakan fotokatalisis dengan titanium dioksida (TiO₂) sebagai agent disinfektan [2]. Penggunaan fotokatalis sebagai pendegradasi limbah telah banyak dilaporkan misalnya dalam mendegradasi limbah organik, anorganik dan polusi yang disebabkan oleh mikroorganisme [1] baik dalam bentuk fasa gas maupun cair [3]. Limbah yang mengandung senyawa berbahaya akan diubah menjadi hasil akhir yang berupa CO₂ dan H₂O. Jika permukaan bahan semikonduktor seperti TiO₂ dikenai energi foton dari sinar ultra violet (UV) yang

mempunyai energi lebih besar dari energi *band gap* semikonduktor tersebut, maka akan terbentuk pasangan elektron (e^-) dan *hole* (h^+) yang dapat mereduksi dan/atau mengoksidasi senyawa-senyawa (polutan) yang ada di sekitar katalis semikonduktor tersebut [4,5].

Adapun mekanisme fotokatalisis TiO₂ dalam menekan pertumbuhan mikroorganisme adalah sebagai berikut: mikroorganisme akan mati setelah kontak dengan hidroksil radikal (\bullet OH) dan *reactive oxygen species* (ROS) yang dihasilkan selama penyinaran terhadap TiO₂. Hidroksil radikal (\bullet OH) memegang peranan penting dalam menginaktivasi mikroorganisme dengan cara mengoksidasi fosfolipid dalam sel membran [6] dimana OH \bullet radikal biasanya 1000 (seribu) atau 10.000 (sepuluh ribu) kali lebih efektif dalam menginaktivasi mikroorganisme dibanding disinfektan pada umumnya misalnya klorin, ozon dan klorin dioksida [7].



Gambar 1. Mekanisme TiO₂ dalam In-aktivasi bakteri setelah terkena sinar UV [8]

Pada penelitian ini TiO₂ katalis yang dipakai adalah TiO₂ Degussa P-25. Katalis TiO₂ ini adalah salah satu semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalisis untuk mengolah limbah-limbah organik karena sifatnya yang inert, stabil dan oksidator kuat [9]. Efektivitas reaksi fotokatalisis dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk partikel yang digunakan, dimana reaksi fotokatalisis akan efektif apabila ukuran partikel berada pada ukuran nano yaitu 1-100 nm. Reaksi fotokatalisis terjadi pada permukaan partikel. Dengan ukuran yang lebih kecil

menjadikan penyebaran partikel semakin rata [3]. Penggunaan TiO₂ pada makanan yang dikonsumsi manusia, obat, kosmetik telah dilaporkan oleh *American Food dan Drug Administration (FDA)*. Menurut *FDA*, TiO₂ bersifat *non toxic* ketika kontak dengan bahan yang berhubungan langsung dengan manusia.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan fotokatalisis TiO₂ dengan menggunakan sinar matahari dan sinar UV terhadap in-aktivasi bakteri *E-coli dan Salmonella*.

BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Pada sub-sub ini akan diuraikan secara rinci bahan-bahan dan tahapan yang diperlukan dalam preparasi katalis. Selanjutnya prosedur pengujian katalis untuk inaktivasi *E-coli dan Salmonella* juga dijelaskan secara rinci. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah model air tercemar yaitu dengan menambahkan bakteri *E-coli dan Salmonella sp* pada air steril. Perbandingan air steril : biakan bakteri pada model air tercemar adalah 99 : 1 . Katalis yang digunakan adalah TiO₂ *Degussa P-25* dengan luas permukaan BET 53,6 m²/g. Sistem yang digunakan adalah katalis serbuk.

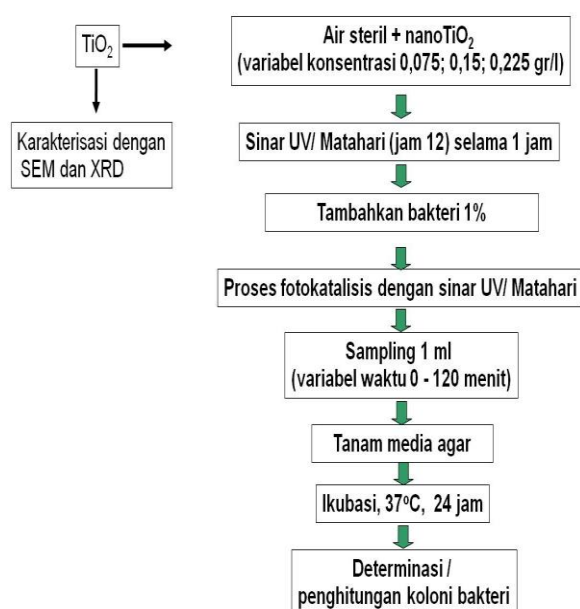
A. Preparasi Katalis

Sol TiO₂ dibuat dengan cara mencampurkan serbuk TiO₂ P-25 *Degussa* dengan air bebas mineral, kemudian dilakukan sonifikasi dengan menggunakan alat *ultrasonic cleaner* selama 30 menit. Setelah itu ditambahkan larutan TEOS (*Tetra Etil Ortho Silikat*) ke dalam sol TiO₂ tersebut dan dilakukan sonifikasi kembali selama 30 menit. Pada saat penambahan larutan TEOS ke dalam sol TiO₂ pH campuran turun dari 4 menjadi 2-1,17. Derajat keasaman larutan mempengaruhi ukuran partikel TiO₂, semakin asam atau basa maka ukuran partikel katalis akan semakin kecil, yang berarti luas permukaannya semakin besar.

Dalam keadaan pH rendah (kondisi asam) permukaan TiO₂ akan bermuatan positif

sehingga daya tolak antar partikel TiO_2 akan semakin besar. Dengan semakin besarnya daya tolak antar partikel akan mempengaruhi distribusi partikel, dimana partikel TiO_2 dapat terdistribusi secara merata diseluruh permukaan cairan [8].

Kemudian sol TiO_2 tersebut dievaporasi pada suhu 90°C sampai semua cairan teruapkan (± 30 menit, 1 jam), dikeringkan di dalam *furnace* pada suhu 90°C selama 2 jam dan dikalsinasi pada suhu 400°C selama 1 jam. Diagram alir proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Fotokatalisis InAktivasi Microorganisme *E Coli* dan *Salmonella*

B. Media Tumbuh dan Preparasi Culture Bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp*

Pembuatan Media Nutrien Agar (NA). Media ini merupakan media agar miring. Sebanyak 23 g NA dilarutkan dalam 1 L akuades lalu dipanaskan dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* sampai homogen. Larutan tersebut dimasukkan ke dalam tabung reaksi sebanyak 5 ml, kemudian ditutup dengan kapas dan almunium foil. Media disterilkan dengan *otoklaf* dengan tekanan 1,5

atm pada suhu 121°C selama 15 menit. Tabung-tabung tersebut dimiringkan sebelum mengeras dan dibiarkan selama 24 jam. Media ini digunakan untuk pertumbuhan bakteri. Formulasi perliter NA DIFCO adalah *beef extract* 3 g, *bacto pepton* 5 g, dan *bacto agar* 15 g.

Pembuatan Media Cair Nutrient Broth (NB). Sebanyak 13 g media NB dilarutkan dalam 1 L akuades, kemudian dipanaskan dan diaduk dengan *magnetic stirrer* sampai homogen. Sebanyak 10 ml larutan tersebut dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer dan ditutup dengan kapas dan almunium foil. Media disterilkan dengan *otoklaf* pada tekanan 1,5 atm, suhu 121°C selama 15 menit.

Regenerasi (Culture) Bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp*. Bakteri dibiakkan pada agar miring/petri steril lalu diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C . Biakan tersebut diambil 1 ose dan diinokulasi ke labu *erlenmeyer* yang berisi 50 ml media cair NB steril. Kemudian biakan diinkubasi pada inkubator bergoyang 150 rpm selama 24 jam dengan suhu 37°C . Setelah diinkubasi kerapatan optik (*optikal density, OD*) bakteri ini diukur pada panjang gelombang 600 nm.

C. Uji Aktifitas Katalis

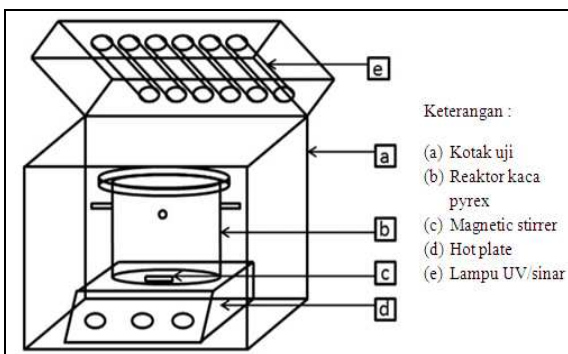
Pengujian aktifitas katalis terhadap inaktivasi bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp* dilakukan dengan menggunakan reaktor fotokatalitik yang terbuat dari kaca *pyrex* dengan sistim *batch* kapasitas volume 500 ml dan dilengkapi dengan pengaduk mekanik. Selubung reaktor terbuat dari almunium foil yang di sisi bagian atas dalamnya dilengkapi dengan enam buah lampu UV *black light lamp* berdaya 10 watt, dengan panjang gelombang maksimum 365 nm dan intensitas cahaya $144 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Selubung ini berfungsi untuk menjaga agar sinar radiasi dari lampu ultraviolet tidak terpancar keluar reactor sehingga sinar ultraviolet dapat terserap secara maksimal oleh katalis. Sedangkan penggunaan sinar matahari dilakukan tepat jam 12 siang diharapkan pada jam ini kondisi maksimum intensitas sinar matahari.

Dalam pengoperasiannya, model air tercemar bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp* yaitu dengan menambahkan culture bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp* yang telah ditumbuhkan pada media NB yang diinkubasi pada incubator bergoyang 150 rpm pada kondisi aerob dengan suhu 37°C selama 24 jam pada air steril.

Model air tercemar yang dipakai adalah air buatan dengan perbandingan air steril : biakan bakteri 99 : 1. Katalis yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam foto-reaktor. Kemudian untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk in-aktifasi bakteri, sampel larutan diambil setiap 10, 20, 30, 40, 50, 60,70,80, 90, 100, 110, 120 menit sebanyak 1 ml.

D. Pengujian (determination) In-aktifasi Bakteria

Jumlah in-aktifasi sel bakteri dalam larutan diuji. Pengujian dilakukan pada bakteri dalam media agar petri setelah dilakukan pengenceran tertentu dimana bakteri ditanam pada media agar. In-aktifasi bakteri diamati setelah diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C. Kemudian dilakukan penghitungan jumlah bakteri dengan *colony counter count*. Pengujian jumlah bakteri dilakukan tiga kali perulangan. Sebelum pengujian dilakukan, dipastikan semua material dilakukan sterilisasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Gambar 3. Reaktor fotokatalisis



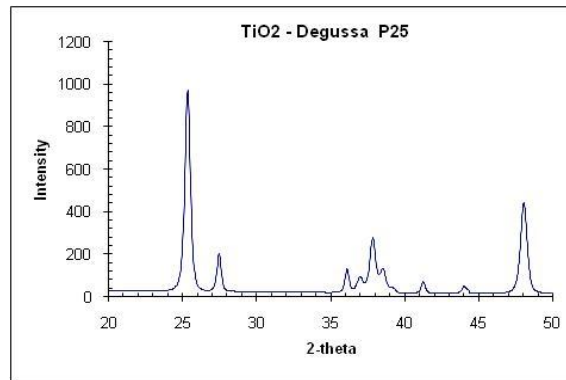
Gambar 3. Fotoreaktor sistem batch untuk uji inaktifas bakteri

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa hal yang akan dibahas dalam sub-sub ini adalah karakterisasi dan uji kinerja katalis dalam in-aktifasi bakteri *E-coli* dan *Salmonella*. Karakterisasi dilakukan dengan *X-Ray Diffraction (XRD)* dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Adapun aspek-aspek yang akan dibahas pada uji kinerja katalis meliputi pengaruh sumber sinar (sinar UV dan sinar matahari), pengaruh konsentrasi katalis TiO₂ dan pengaruh initial jumlah bakteri terhadap in-aktifasi bakteri *E-coli* dalam model air tercemar.

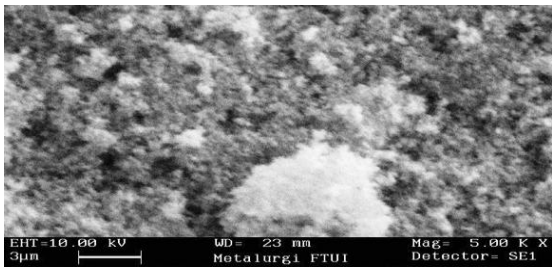
A. Karakterisasi TiO₂

Hasil karakterisasi TiO₂ nanopartikel menggunakan *XRD* dapat dilihat pada Gambar 4. Ada dua struktur dominan dari TiO₂ nanopartikel yaitu rutil dan anatase. Dari hasil karakterisasi TiO₂ Degussa P-25 didapatkan bahwa struktur kristal anatase sebesar 78,2% dan struktur kristal rutil 22,71%. Sedangkan luas permukaan sebesar 53,6 m²/g.



Gambar 4. Karakterisasi TiO₂ Degussa P-25 dengan alat *XRD*

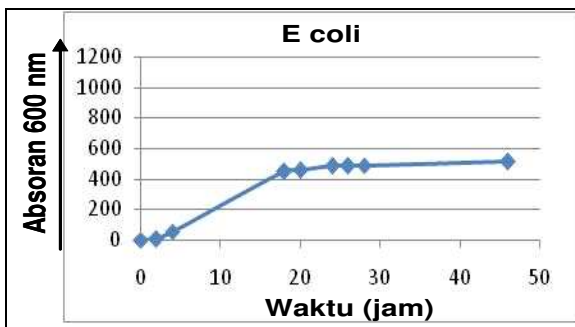
Sedangkan hasil karakterisasi TiO₂ nanopartikel dengan *SEM* dapat dilihat pada Gambar 5. Bentuk TiO₂-Degussa P-25 terlihat seperti kapas dengan ukuran 25 nm.



Gambar 5. Karakterisasi TiO₂ Degussa P-25 dengan alat SEM

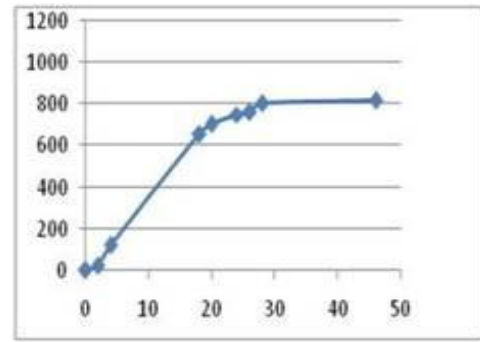
B. Regenerasi (Culture) Bakteri *E-coli* dan *Salmonella sp*

Gambar 6 memperlihatkan pertumbuhan bakteri *E-coli* setelah biakan dengan cara diinkubasi selama 48 jam. Dari hasil yang didapat terlihat bahwa bakteri sudah tidak berkembang lagi setelah 24 jam. Dengan demikian karena setelah 24 jam sudah tidak tumbuh yang berarti pertumbuhan eksponensial terjadi pada 24 jam.

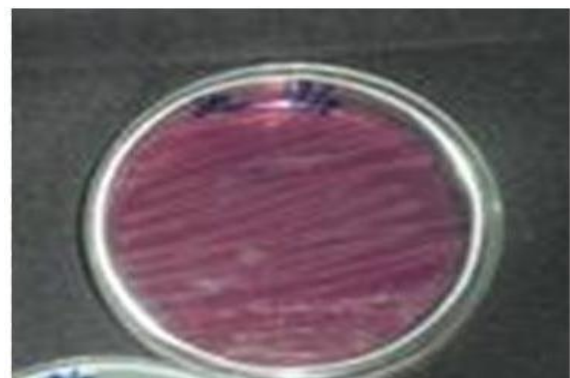


Gambar 6. Pertumbuhan eksponensial bakteri *E-coli*

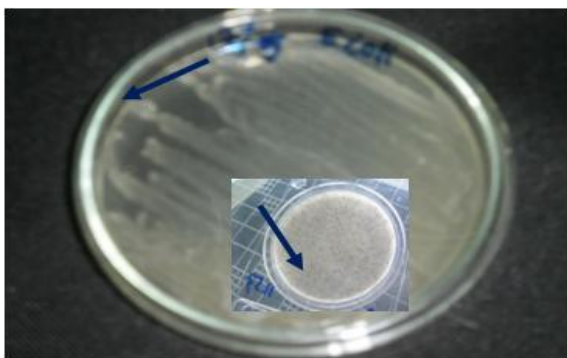
Pertumbuhan bakteri *Salmonella sp* setelah diinkubasi selama 24 jam, dari grafik memperlihatkan bahwa pertumbuhan bakteri *Salmonella sp* sangat cepat dan mencapai nilai eksponensial pada menit ke 30 (Gambar 8 dan 9).



Gambar 8. Pertumbuhan eksponensial bakteri *Salmonella sp*



Gambar 9. Biakan bakteri *Salmonella sp* pada media agar

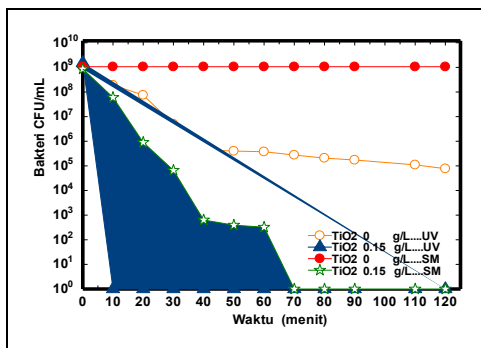


Gambar 7. Biakan bakteri *E-coli* pada media agar

C. Fotokatalisis Inaktifasi *E-coli* dengan Sinar UV dan Sinar Matahari

Efisiensi fotokatalisis disinfektan air berfluktuasi tergantung beberapa parameter yaitu intensitas sinar, penyerapan sinar, konsentrasi initial bakteri dan temperatur air. Dengan adanya radikal dan katalis in-aktifasi juga dipengaruhi oleh kandungan in-organik dan organik dalam air yang berpengaruh pada efektifitas proses [8]. Pada penelitian ini dilakukan proses disinfektan secara fotolisis (hanya dengan sinar) dan fotokatalisis (katalis TiO₂ dengan sinar).

Gambar 10 memperlihatkan bahwa perbandingan antara disinfektan secara fotolisis dan fotokatalisis TiO₂ dengan sinar UV dan sinar matahari. Fotolisis disinfektan dengan matahari tidak dapat menurunkan jumlah *E-coli*. Sementara disinfektan secara fotolisis dengan UV dapat menurunkan jumlah *E-coli* ± 30% setelah 50 menit, akan tetapi tidak terjadi penurunan secara berarti walaupun dipanaskan sampai 2 jam. Perbedaan daya in-aktifasi antara sinar matahari dan UV disebabkan karena intensitas matahari tidak konstan dan penyebaran sinar matahari yang sangat luas.

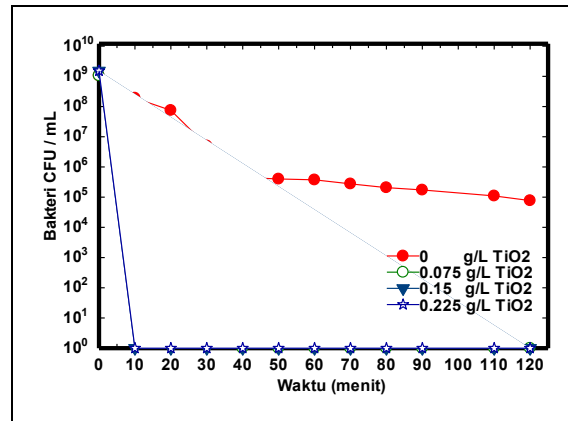


Gambar 9. Time course perubahan inaktifasi bakteri *E-coli* pengaruh fotolisis dan fotokatalis TiO₂ (0,15 g/L) dengan menggunakan sinar matahari dan sinar UV

Sementara itu dengan penambahan katalis TiO₂ (0,15 g/L) dengan menggunakan sinar UV hanya dapat meninaktifkan *E-coli* hanya dalam waktu 10 menit dimana hampir semua *E-coli* tidak aktif atau mati. Sedangkan dengan menggunakan sinar matahari dibutuhkan pada 70 menit untuk menginaktifkan semua bakteri *E-coli*.

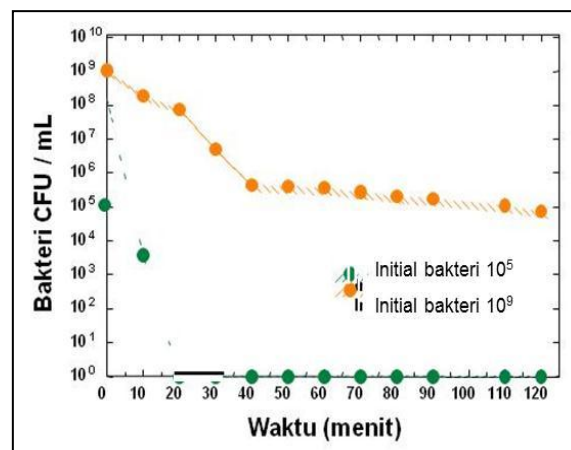
Penambahan katalis TiO₂ sangat berpengaruh terhadap inaktifasi bakteri *E-coli* Gambar 10 memperlihatkan hasil inaktifasi *E-coli* secara fotokatalisis dengan penambahan katalis TiO₂ sebanyak 0; 0,075; 0,15 dan 0,225 g/L. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan sinar UV sebagai in-aktifasi *E-coli* tidak dapat menginaktifkan *E-coli* walaupun sudah disinari selama 2 jam. Dilain pihak penggunaan katalis TiO₂ dengan konsentrasi 0,075 g/L sebagai inaktifasi *E-coli* menunjukkan bahwa dapat membunuh bakteri setelah 40 menit proses.

Sedangkan dengan konsentrasi TiO₂ sebesar 0,15 dan 0,225 g/L semua bakteri *E-coli* sudah inaktif dalam waktu 10 menit. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa penambahan katalis TiO₂ berpengaruh terhadap inaktifasi bakteri *E coli*.



Gambar 10. Time course perubahan inaktifasi bakteri *E-coli* pengaruh konsentrasi katalis TiO₂ dengan menggunakan sinar UV

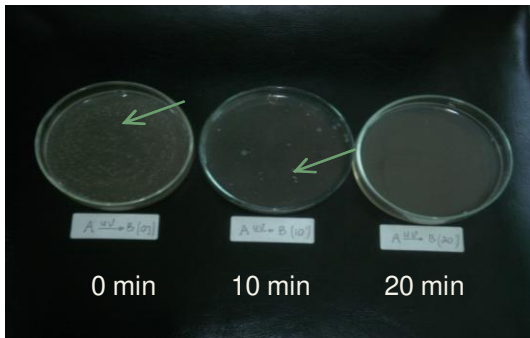
Pengaruh initial bakteri *E-coli* dilakukan dengan membandingkan 0,1 % dan 1 % bakteri kedalam wadah percobaan. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Time course perubahan inaktifasi bakteri *E-coli* pengaruh initial konsentrasi bakteri *E-coli* dengan menggunakan sinar UV

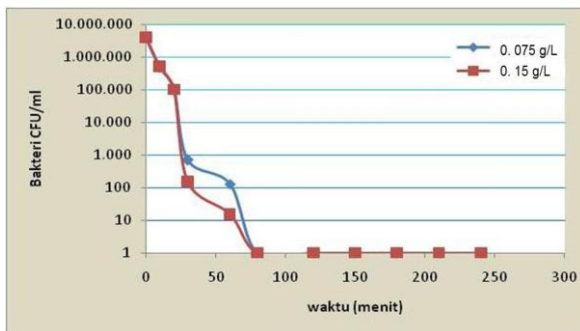
Jumlah initial bakteri *E-coli* berpengaruh terhadap inaktifasi total bakteri. Pada jumlah

initial bakteri *E-coli* 0,1% dalam waktu 20 menit semua bakteri *E-coli* sudah tidak aktif sedangkan dengan initial bakteri 1%, bakteri masih aktif walaupun sudah disinari selama 2 jam, Gambar 12.



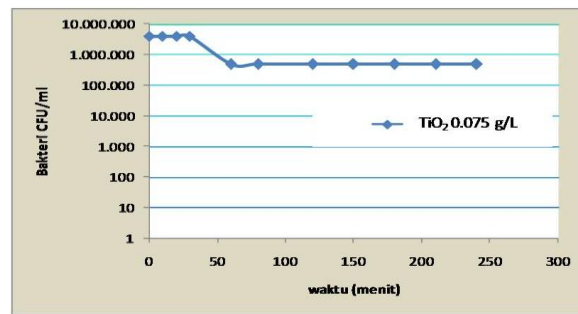
Gambar 12. Perubahan inaktivasi bakteri *E-coli* pengaruh initial konsentrasi bakteri *E-coli* dengan menggunakan sinar UV pada media petri setelah inkubasi 24 jam

D. Fotokatalisis Inaktivasi *Salmonella sp* dengan Sinar UV dan Sinar Matahari



Gambar 13. Time course perubahan inaktivasi bakteri *Salmonella sp* dengan menggunakan nano TiO₂ konsentrasi 0.075 g/L dan 0.015 g/L dengan sinar UV

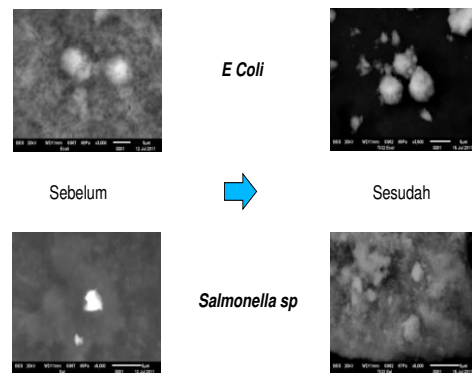
Gambar 13 memperlihatkan bahwa dengan penambahan TiO₂ 1% bakteri *Salmonella* sudah memperlihatkan inaktif dalam waktu 80 menit. Hal ini memperlihatkan bahwa bakteri *Salmonella sp* lebih tahan dari pada bakteri *E-coli*. Sedangkan Gambar 14 memperlihatkan bahwa dengan menggunakan sinar matahari bakteri *Salmonella sp* hanya sebagian yang inaktif.



Gambar 14. Time course perubahan inaktivasi bakteri *Salmonella* dengan menggunakan nano TiO₂ konsentrasi 0.075 g/L dengan sinar matahari

Karakteristik Morfologi Koloni Sel Bakteri Menggunakan SEM Sebelum Dan Sesudah Inaktivasi Dengan TiO₂

Koloni sel bakteri *E coli* dan *Salmonella* sebelum dan sesudah kontak dengan TiO₂ dapat dilihat pada Gambar 15. Sebelum kontak dengan TiO₂ koloni sel memperlihatkan dinding sell yang mengkilat, tetapi setelah dilakukan kontak dengan TiO₂ dinding sel menjadi lisis oleh TiO₂ dan akhirnya sel mikroba menjadi inaktif



Gambar 15. Koloni sel bakteri *E coli* dan *Salmonella* sebelum dan sesudah kontak dengan TiO₂

KESIMPULAN

1. Pemakaian TiO₂ sebagai desinfektan sangat efektif dan bersifat *non toxic* (American Food and Drug Administration,

- FDA) dibanding penggunaan klor yang selama ini dipakai PDAM .
2. Fotokatalisis TiO₂ dengan lampu UV dapat meninaktifasi bakteri *E-coli* dalam waktu <10 menit dengan konsentrasi 0,15 g/L sedangkan dengan sinar matahari (jam 12-13) meninaktifasi waktu >65 menit.
 3. Fotokatalisis TiO₂ dengan lampu UV dapat meninaktifasi bakteri *Salmonella sp* dalam waktu >80 menit dengan konsentrasi 0,075 g/L sedangkan dengan sinar matahari (jam 12-13) hanya sebagian kecil bakteri yang inaktif

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi, atas bantuan finansialnya melalui Proyek Penelitian dan Perekrayaan tahun anggaran 2010. Penelitian ini merupakan sebagian data yang didapatkan. Ucapan terimakasih juga kami sampaikan pada anggota lab mikrobiologi BBKK atas kerjasamanya dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Angela-Guiovana Rincon, Cesar Pulgarin, Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E-coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂ implications in solar water disinfectan, *Applied Catalyst B: Environmental* 51(2004) 283-302.
- [2] Angela - Guiovana Rincon, Cesar pulgarin. Bacterial action of illuminated TiO₂ on pure E coli and natural bacterial consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time. *Applied Catalysis B: Environmental* 49(2004) 99-112.
- [3] Cho, M., Chung, H., Choi, W., Yoon, J., Linear correlation between inactivation of *E-coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfectan. *Water Research* 38(4), (2004). 1069-1077.
- [4] Cheng, T. C, Chang, Y. C., Chang, C. I., Hwang, C. J., Hsu, H. C., Wang, D. Y., Yao, K. S. Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ film on fish pathogens. *Surface and Coating Technology*. 203 (2008) 925-927.
- [5] Herrmann, J.M., Heterogenous photocatalytic: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutions. *Cat. Today*. Vol 53, (1999), 115-129.
- [6] Song . H. Y., Ko. K. K., Oh. H. I., Lee. B. T. Fabrication of silver nanoparticles and their antimicrobial mechanisms. *European Cell and Materials*. Vol. 1. Suppl. 1, 2006. 58
- [7] Li X Z, Zhang M, Chua H,. Disinfection of municipal wastewater by sensitized photooxidation. *Water Sci Tech*, 33(3) (1996), 111–118.
- [8] LI Youji, MA Mingyuan, WANG Xiaohu, WANG Xiaohua, Inactivated properties of activated carbon-supported TiO₂ nanoparticles for bacteria and kinetic study, *Journal of Environmental Sciences* 20 (2008), 1527–1533.
- [9] Linsebigler, A.L. Photocatalytic on TiO₂ Surface: Principle Mechanism and Selected Results, *Chem. Rev.* Vol 95. (1995), 735-758
- [10] R.A. Meinzer and P.J. Birbara, Photocatalytic semiconductor coating, US Patent 5.593.737. 1997.
- [11] Saito, T., Iwase, T., Horie, J., Moriisasi oka, T., Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO₂ on mutans streptococci, *J. Photochem Photobiol B*, 14, (1997) 369-379.
- [12] Slamet, Setijo Bimo, Rita Arbianti, Zulaina Sari; Penyisihan fenol dengan kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalisis menggunakan karbon aktif dan TiO₂.