

Analisis Pengaruh Karakteristik Aliran Laminer dan Turbulen Pada Fotokatalitik Terhadap Penurunan Bakteri *Escherichia Coli* Dalam Air Tanah

Nabila Putri Dinatha, Firra Rosariawari*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: firra.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 30 April 2026

Disetujui: 5 Mei 2026

Abstract

Groundwater in densely populated areas has the potential to experience biological contamination due to the presence of *Escherichia coli* bacteria which can endanger public health. This study aims to analyze the effectiveness of the photocatalytic process with different characteristics of laminar and turbulent flow in reducing *Escherichia coli* bacteria in groundwater. This laboratory-scale study used a fixed bed photocatalytic continuous flow reactor with TiO_2 catalyst immobilized on gauze media and ultraviolet (UV) irradiation. The variables tested included the type of flow (laminar and turbulent), variations in Hydraulic Retention Time (HRT) for 10, 15, 20, 25, and 30 minutes, and the effect of Dissolved Oxygen (DO) levels. The research stages included catalyst preparation through the dip coating method, raw water characterization, and reactor operation until stable conditions. The results showed that optimum operational conditions were achieved in the turbulent flow photocatalytic process with an HRT of 30 minutes, which resulted in a higher reduction in *Escherichia coli* bacteria compared to laminar flow. Increasing DO levels in a turbulent system also increases process efficiency through greater reactive oxygen species (ROS) formation. Supporting parameters such as pH, temperature, and turbidity are within the range that supports the photocatalysis process. It was concluded that increasing mixing intensity and residence time are directly proportional to bacterial degradation efficiency due to increased contact between bacteria, dissolved oxygen, the catalyst surface, and oxidative radicals.

Keywords: *photocatalysis, dissolved oxygen, escherichia coli, ground water*

Abstrak

Air tanah di kawasan padat penduduk berpotensi mengalami pencemaran biologis akibat keberadaan bakteri *Escherichia coli* yang dapat membahayakan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas proses fotokatalisis dengan perbedaan karakteristik aliran laminer dan turbulen dalam menurunkan bakteri *Escherichia coli* pada air tanah. Penelitian skala laboratorium ini menggunakan reaktor *fixed bed photocatalytic continuous flow* dengan katalis TiO_2 terimobilisasi pada media kasa dan penyinaran sinar ultraviolet (UV). Variabel yang diuji meliputi jenis aliran (laminer dan turbulen), variasi *Hydraulic Retention Time* (HRT) selama 10, 20, dan 30 menit, serta pengaruh kadar *Dissolved Oxygen* (DO). Tahapan penelitian mencakup persiapan katalis melalui metode *dip coating*, karakterisasi air baku, serta pengoperasian reaktor hingga kondisi stabil. Hasil menunjukkan bahwa kondisi operasional optimum tercapai pada proses fotokatalisis aliran turbulen dengan HRT 30 menit, yang menghasilkan penurunan bakteri *Escherichia coli* lebih tinggi dibandingkan aliran laminer. Peningkatan kadar DO pada sistem turbulen turut meningkatkan efisiensi proses melalui pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) yang lebih besar. Parameter pendukung seperti pH, suhu, dan kekeruhan berada pada rentang yang mendukung proses fotokatalisis. Disimpulkan bahwa peningkatan intensitas pencampuran dan waktu tinggal berbanding lurus dengan efisiensi penurunan bakteri karena meningkatkan kontak antara bakteri, oksigen terlarut, permukaan katalis, dan radikal oksidatif.

Kata Kunci: *fotokatalis, oksigen terlarut, escherichia coli, air tanah*

1. Pendahuluan

Air merupakan kebutuhan dasar yang sangat penting bagi kehidupan manusia, baik untuk keperluan konsumsi, sanitasi, maupun aktivitas domestik lainnya. Di banyak wilayah padat penduduk, air tanah masih menjadi sumber utama pemenuhan kebutuhan air bersih melalui sumur gali maupun sumur pompa. Namun, kualitas air tanah saat ini menghadapi ancaman pencemaran mikrobiologis akibat sistem sanitasi yang kurang memadai, kebocoran septic tank, serta pembuangan limbah domestik yang tidak terkontrol. Salah

satu indikator pencemaran biologis yang umum ditemukan adalah bakteri *Escherichia coli*, yang menunjukkan adanya kontaminasi fekal dan berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan seperti diare, tifus, dan penyakit saluran pencernaan lainnya [1].

Keberadaan *Escherichia coli* dalam air tanah menjadi permasalahan serius karena bakteri ini mampu bertahan hidup pada kondisi lingkungan tertentu dan berkembang biak apabila didukung oleh nutrisi yang cukup. Apabila air tercemar digunakan secara langsung tanpa pengolahan, maka risiko penularan penyakit berbasis air akan meningkat. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan air yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menurunkan jumlah bakteri patogen pada air tanah sebelum digunakan masyarakat [2].

Salah satu teknologi yang berkembang dalam pengolahan air adalah proses fotokatalisis menggunakan titanium dioksida (TiO_2) sebagai katalis dan sinar ultraviolet (UV) sebagai sumber energi. TiO_2 merupakan material semikonduktor yang mampu menghasilkan pasangan elektron dan hole ketika terpapar cahaya dengan energi yang sesuai [3]. Reaksi tersebut memicu pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan superoksida ($\text{O}_2\bullet^-$) yang bersifat sangat oksidatif dan mampu merusak dinding sel, membran, serta materi genetik bakteri hingga menyebabkan inaktivasi mikroorganisme. Teknologi ini memiliki keunggulan karena tidak menghasilkan residu kimia berbahaya serta dapat diaplikasikan secara berkelanjutan [4].

Efektivitas proses fotokatalisis tidak hanya dipengaruhi oleh jenis katalis dan intensitas cahaya, tetapi juga oleh karakteristik hidrodinamika aliran di dalam reaktor. Pada aliran laminar, pergerakan fluida cenderung teratur dengan pencampuran yang terbatas sehingga distribusi oksigen, kontak bakteri dengan permukaan katalis, dan penyebaran cahaya relatif kurang optimal. Sebaliknya, aliran turbulen menghasilkan pencampuran lebih intensif sehingga meningkatkan transfer massa, homogenitas larutan, serta peluang interaksi antara bakteri, oksigen terlarut, dan katalis TiO_2 . Selain itu, kadar *dissolved oxygen* (DO) berperan penting sebagai akseptor elektron dalam pembentukan ROS yang menentukan keberhasilan proses fotokatalitik [5].

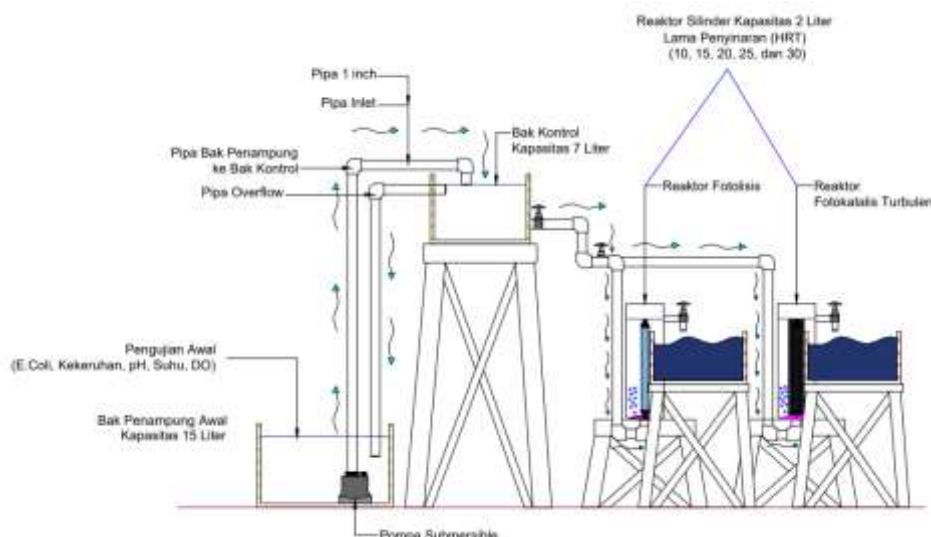
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh waktu tinggal hidrolis (*Hydraulic Retention Time/HRT*), kadar DO, dan karakteristik aliran laminar serta turbulen terhadap penurunan bakteri *Escherichia coli* pada air tanah menggunakan reaktor fotokatalitik tipe *fixed bed continuous flow*. Fokus penelitian ini adalah mengevaluasi efektivitas sistem aliran terhadap proses inaktivasi bakteri sehingga diperoleh kondisi operasional optimum yang dapat menjadi alternatif teknologi desinfeksi air tanah yang efisien dan ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis efektivitas proses fotokatalisis dalam menurunkan bakteri *Escherichia coli* pada air tanah menggunakan variasi sistem aliran laminar dan turbulen. Sampel air tanah diperoleh dari sumur warga di kawasan padat penduduk yang terindikasi mengalami pencemaran mikrobiologis. Air baku kemudian diuji karakteristik awal meliputi jumlah *Escherichia coli*, pH, suhu, kekeruhan, dan *dissolved oxygen* (DO) sebagai dasar evaluasi proses pengolahan.

2.1. Desain Reaktor

Reaktor yang digunakan berupa sistem fotokatalitik tipe *fixed bed continuous flow* yang terdiri atas bak penampung influen, pompa pengalir, tabung reaktor, sumber cahaya ultraviolet (UV), media kasa berlapis TiO_2 sebagai katalis terimobilisasi, serta bak penampung efluen. Air dialirkan secara kontinu melewati media katalis selama proses penyinaran berlangsung. Variasi aliran laminar diperoleh melalui pengaturan debit rendah, sedangkan aliran turbulen dihasilkan dengan peningkatan debit aliran dan bantuan aerasi.



Gambar 1. Reaktor Fotokatalisis
 Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

2.2 Variabel Penelitian

Variabel Bebas	: Karakteristik Aliran (Laminer dan Turbulen), Waktu Penyinaran/HRT (10, 20, dan 30 menit)
Variabel Terikat	: Jarak Pemaparan, Lampu UV-C (13 watt), Media (Kasa 12 mesh), Aerator (Debit udara 3L/min), Massa Katalis (20 g)
Variabel Kontrol	: pH, Suhu, Kekeruhan

2.3 Analisis Data

Dalam penelitian ini metode analisis yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Analisis Persentase Penurunan

$$\text{Persentase Penurunan} = \left(\frac{\text{Jumlah bakteri awal} - \text{Jumlah bakteri akhir}}{\text{Jumlah bakteri awal}} \right) \times 100\%$$

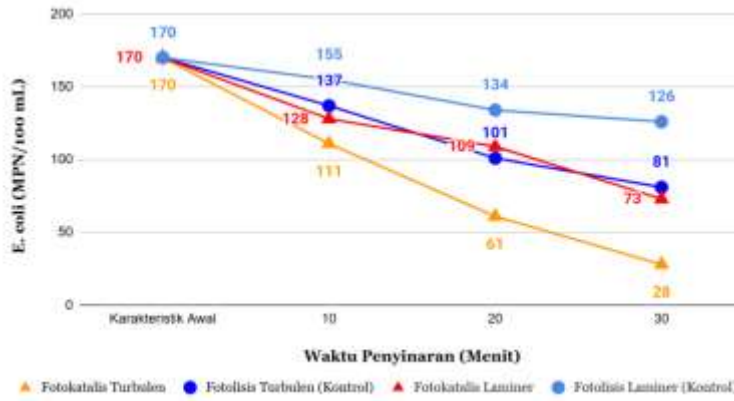
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh Waktu Penyinaran terhadap *Escherichia Coli* dalam Aliran Laminer dan Turbulen

Hydraulic Retention Time (HRT)/waktu penyinaran merupakan parameter operasional yang sangat berpengaruh dalam proses fotolisis dan fotokatalisis, karena menentukan lamanya kontak antara mikroorganisme, katalis, dan radiasi cahaya di dalam reaktor. Semakin lama HRT maka semakin besar peluang terjadinya interaksi antara spesies reaktif dengan sel bakteri, sehingga meningkatkan efektivitas proses penurunan *Escherichia coli*. Dalam sistem fotokatalisis, peningkatan HRT menyebabkan terjadi pembentukan dan akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS), seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang berperan penting dalam merusak struktur sel bakteri [6].

Gambar 2 menjelaskan bahwa kondisi aliran laminer menunjukkan tren penurunan bakteri cenderung lebih lambat. Fotolisis berguna sebagai kontrol variabel untuk menentukan sejauh mana kontribusi sinar UV secara mandiri dalam menginaktivasi bakteri *E. coli*. Pada metode fotokatalis, jumlah bakteri berkurang dari 170 MPN/100 mL menjadi 73 MPN/100 mL dalam waktu 30 menit, dan pada fotolisis berkurang dari 170 MPN/100 mL menjadi 126 MPN/100 mL.

Sedangkan pada aliran turbulen, efektivitas penurunan yang jauh lebih signifikan pada kondisi aliran turbulen. Pada fotokatalis, jumlah bakteri menurun drastis dari 170 MPN/100 mL menjadi hanya 28 MPN/100 mL pada menit ke-30. Penurunan tajam ini menunjukkan kondisi turbulen meningkatkan pencampuran fluida sehingga kontak antara bakteri, katalis TiO_2 , oksigen terlarut, dan cahaya menjadi lebih merata. Akibatnya pembentukan radikal oksidatif seperti hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan superoksida ($\text{O}_2^{\bullet-}$) menjadi lebih efektif dalam merusak dinding sel, membran, dan komponen internal bakteri hingga menyebabkan kematian sel [7]. pada fotolisis, terjadi penurunan dari 170 MPN/100 mL menjadi 81 MPN/100 mL yang jauh diatas fotokatalis, penurunan hanya disebabkan oleh paparan sinar UV dan ROS alami dalam jumlah terbatas, sehingga efisiensinya lebih rendah dibandingkan fotokatalisis [8].

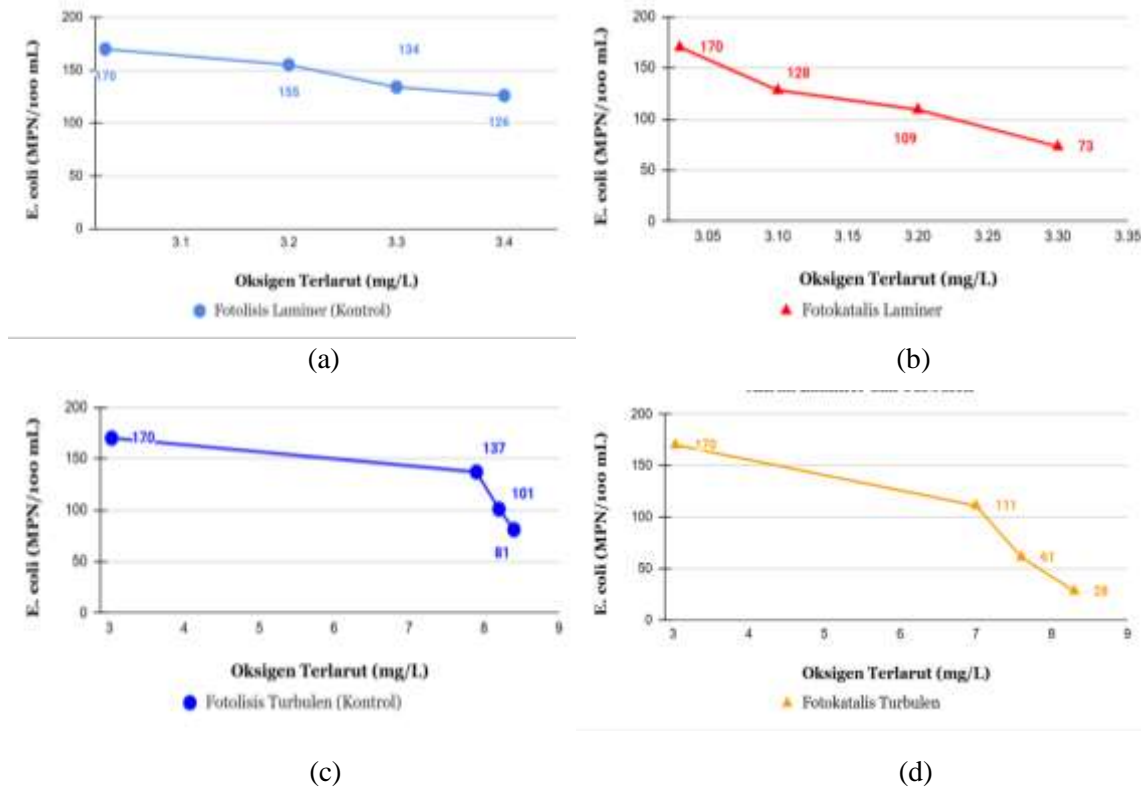


Gambar 2. Grafik Hubungan HRT dan Aliran terhadap Penurunan *E. Coli*

Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara waktu penyinaran, aliran turbulen dan keberadaan katalis menghasilkan kondisi paling efektif dalam menurunkan jumlah *Escherichia coli*, ini juga membuktikan bahwa aliran turbulen meminimalkan zona mati (*dead zones*) dalam reaktor dan memastikan bahwa radikal hidroksil yang dihasilkan di permukaan katalis dapat segera berinteraksi dengan target biologis, sehingga mengoptimalkan fungsi HRT dalam proses inaktivasi mikroorganisme [9].

3.2. Pengaruh *Dissolved Oxygen* (DO) terhadap *Escherichia Coli* dalam Aliran Laminar dan Turbulen

Dissolved Oxygen (DO) dalam proses fotolisis dan fotokatalisis berperan sebagai akseptor elektron yang mendukung pembentukan spesies oksidatif reaktif (*Reactive Oxygen Species/ROS*), seperti radikal superoksida ($O_2^{\bullet-}$) dan radikal hidroksil ($\bullet OH$). Pengaruh fotokatalis TiO_2 juga sangat signifikan dibandingkan proses fotolisis tanpa katalis. Pada fotokatalisis, energi cahaya digunakan untuk mengaktifasi TiO_2 sehingga menghasilkan pasangan elektron-hole yang memicu reaksi oksidasi dan reduksi [10]. Dengan adanya DO yang cukup, proses ini menjadi lebih efisien karena mengurangi kemungkinan rekombinasi dan meningkatkan jumlah radikal yang tersedia untuk menyerang bakteri.



Gambar 3. (a) Grafik Hubungan DO terhadap *E. Coli* (a) Pada Fotolisis Laminar (b) Pada Fotokatalis Laminar (c) Pada Fotolisis Turbulen (d) Pada Fotokatalis Turbulen

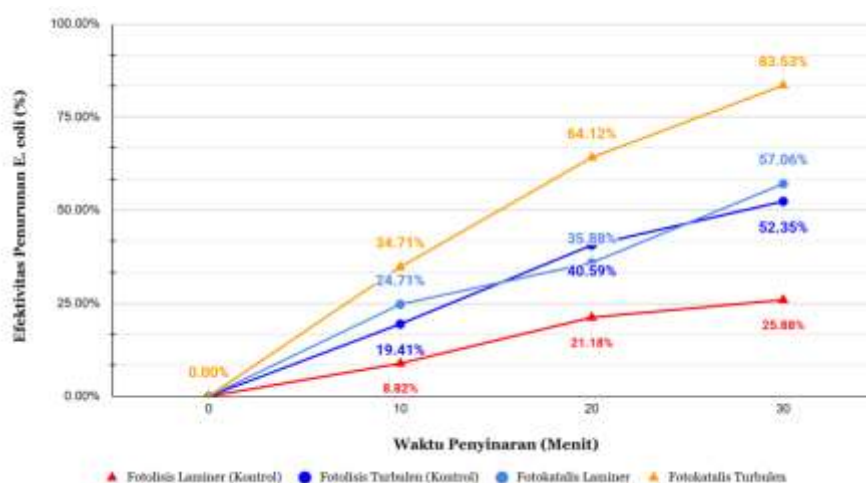
Berdasarkan **Gambar 3**, pada fotolisis laminar menjelaskan bahwa terjadi peningkatan DO dari 3.0 mg/L ke 3.4 mg/L berkontribusi pada penurunan bakteri dari 170 MPN/100 mL menjadi 126 MPN/100 mL. Namun, kemiringan (*slope*) pada grafik ini cenderung landai. Hal ini mengindikasikan bahwa pada proses fotolisis, oksigen berperan dalam proses oksidasi alami akibat radiasi UV, tetapi efektivitasnya terbatas karena tidak adanya katalis yang mempercepat pembentukan spesies oksigen reaktif. Sedangkan pada proses fotokatalis laminar menunjukkan terjadi peningkatan DO yang relatif kecil (hingga 3,30 mg/L) tetapi terjadi penurunan jumlah bakteri yang tajam mencapai 73 MPN/100 mL. Oksigen berperan sebagai akseptor elektron yang menangkap elektron dari pita konduksi katalis, sehingga mencegah terjadinya rekombinasi muatan dan secara bersamaan membentuk radikal superoksida yang membantu mematikan bakteri [11].

Pada proses fotolisis turbulen, terlihat bahwa aliran turbulen mampu meningkatkan kadar *Dissolved Oxygen* (DO) hingga mencapai rentang 7.8 - 8.4 mg/L. Peningkatan DO yang signifikan ini terjadi karena adanya penambahan DO oleh aerator yang berfungsi sebagai *supply* oksigen, hal ini berhubungan dengan penurunan jumlah bakteri *E. coli* dari 170 MPN/100 mL menjadi 81 MPN/100 mL. Adanya turbulensi karena proses *supply* oksigen membantu distribusi oksigen dan penetrasi cahaya menjadi lebih merata ke seluruh volume air, sehingga proses penurunan bakteri melalui mekanisme oksidasi alami menjadi lebih efektif dibandingkan kondisi laminar [12]. Sedangkan pada proses fotokatalis turbulen, ini menunjukkan hasil terbaik dari semua variasi yang dilakukan, dimana kombinasi antara aliran turbulen, kadar DO yang tinggi (mencapai >8 mg/L) dan katalis menghasilkan penurunan bakteri yang sangat tajam, menyisakan hanya 28 MPN/100 mL. Kemiringan kurva yang sangat curam setelah DO melewati 7 mg/L menunjukkan adanya percepatan reaksi kimia.

Aliran turbulen bergerak membawa oksigen terlarut (DO) ke permukaan katalis dengan cepat untuk diubah menjadi radikal superoksida ($O_2^{\cdot-}$) dan radikal hidroksil ($\cdot OH$). Turbulensi juga membantu meningkatkan transfer massa pada bakteri sehingga merata terkena oleh seluruh bakteri [13].

3.3. Efektivitas Penurunan *Escherichia Coli* dalam Aliran Laminar dan Turbulen

Berdasarkan **Gambar 4** terlihat bahwa seluruh variasi menunjukkan kurva peningkatan efektivitas seiring dengan bertambahnya waktu penyinaran atau *Hydraulic Retention Time* (HRT), seluruh variasi menunjukkan kurva pertumbuhan efektivitas yang pesat pada 15 menit pertama, namun secara bertahap mulai melandai (mengalami penurunan laju) saat memasuki menit ke-20 hingga ke-30. Hal ini bisa terjadi karena seiring bertambahnya waktu penyinaran (HRT), populasi bakteri *E. coli* di dalam reaktor semakin berkurang secara signifikan. Penurunan konsentrasi *E. coli* ini otomatis menurunkan peluang terjadinya tumbukan efektif antara *E. coli* yang tersisa dengan radikal hidroksil maupun paparan UV. Hal ini menyebabkan penambahan efektivitas pada menit-menit akhir tidak signifikan pada menit awal saat populasi bakteri masih melimpah [14].



Gambar 4. Grafik Hubungan Efektivitas Fotokatalis berdasarkan Aliran dalam Penurunan *E. Coli*

Berdasarkan grafik tersebut juga menjelaskan bahwa fotokatalis turbulen menunjukkan efektivitas paling unggul dengan pencapaian 83,53% pada menit ke-30. kurva ini memiliki kemiringan (*slope*) paling curam, yang mengindikasikan laju reaksi tercepat. Kombinasi antara katalis yang menghasilkan radikal

hidroksil dan aliran turbulen yang mempercepat perpindahan massa memungkinkan inaktivasi bakteri terjadi secara maksimal [15].

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, waktu penyinaran atau *Hydraulic Retention Time* (HRT) berpengaruh terhadap penurunan bakteri *Escherichia Coli* paling efisien adalah pada waktu penyinaran 30 menit pada masing-masing perlakuan. Pada analisis mengenai oksigen terlarut (DO) juga terlihat bahwa DO berpengaruh terhadap penurunan *E. coli* dalam sistem dimana hasil menunjukkan pada rentang $DO > 8$, efektivitas penurunan *E. Coli* mencapai titik tertingginya mencapai 28 MPN/100 mL pada fotokatalis dan 81 MPN/100 mL pada fotolisis. Sistem aliran turbulen pada fotokatalis memiliki efektivitas lebih tinggi dibandingkan aliran laminar mencapai persentase efektivitas 83,53%. Dengan demikian, sistem turbulen menjadi kondisi operasi yang paling optimal dalam meningkatkan efektivitas penurunan bakteri *Escherichia coli*.

5. Referensi

- [1] W. P. Rahayu, S. Nurjanah, and E. Komalasari, "Escherichia coli: Pajian, Analisis dan Kajian Risiko," *IPB Press*, pp. 1–151, 2018.
- [2] Sumampouw, Oksfrian Jufri, and Yenni Risjani. *Indikator Pencemaran Lingkungan*. Deepublish, 2018.
- [3] S. Naimah and R. Ermawati, "Efek Fotokatalisis Nano TiO₂ terhadap Mekanisme Antimikrobia," *J. Ris. Ind.*, vol. V, no. 2, pp. 113–120, 2011.
- [4] M. A. Al-Nuaim, A. A. Alwasiti, and Z. Y. Shnain, "The photocatalytic process in the treatment of polluted water," *Chem. Pap.*, vol. 77, no. 2, pp. 677–701, 2023, doi: 10.1007/s11696-022-02468-7.
- [5] A. Baez and J. Shiloach, "Escherichia coli avoids high dissolved oxygen stress by activation of SoxRS and manganese-superoxide dismutase," *Microb. Cell Fact.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1186/1475-2859-12-23.
- [6] T. O. Ajiboye, S. O. Babalola, and D. C. Onwudiwe, "Photocatalytic inactivation as a method of elimination of e. Coli from drinking water," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/app11031313.
- [7] A. Chakravorty and S. Roy, "A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials," *Sustain. Chem. Environ.*, vol. 8, no. September, p. 100155, 2024, doi: 10.1016/j.scenv.2024.100155.
- [8] H. S. Zakria, M. H. D. Othman, R. Kamaludin, S. H. Sheikh Abdul Kadir, T. A. Kurniawan, and A. Jilani, "Immobilization techniques of a photocatalyst into and onto a polymer membrane for photocatalytic activity," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 12, pp. 6985–7014, 2021, doi: 10.1039/d0ra10964a.
- [9] N. W. Dahl, P. L. Woodfield, B. A. F. Simpson, H. M. Stratton, and C. J. Lemckert, "Effect of turbulence, dispersion, and stratification on Escherichia coli disinfection in a subtropical maturation pond," *J. Environ. Manage.*, vol. 288, no. November 2020, p. 112470, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112470.
- [10] O. Rojviroon and T. Rojviroon, "Photocatalytic process augmented with micro/nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater," *Water Resour. Ind.*, vol. 27, no. October 2021, p. 100169, 2022, doi: 10.1016/j.wri.2021.100169.
- [11] I. I. Nwajuaku and J. C. Agunwamba, "Evaluating the aeration efficiency of hydraulic flume on photo-oxidative disinfection of wastewater," *Results Eng.*, vol. 20, no. June, p. 101455, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101455.
- [12] C. Khosla, J. E. Curtis, J. Demodena, U. Rinas, and J. E. Bailey, "Expression of intracellular hemoglobin improves protein synthesis in oxygen-limited escherichia coli," *Bio/Technology*, vol. 8, no. 9, pp. 849–853, 1990, doi: 10.1038/nbt0990-849.
- [13] E. Cabisco, J. Tamarit, and J. Ros, "Oxidative stress in bacteria and protein damage by reactive oxygen species," *Int. Microbiol.*, vol. 3, no. 1, pp. 3–8, 2000.
- [14] Danyliuk, Nazarii, et al. "Kinetics of H₂O₂ Decomposition and Bacteria Inactivation in a Continuous-Flow Reactor with a Fixed Bed of Cobalt Ferrite Catalyst." *Applied Sciences* 15.15 (2025): 8195.
- [15] M. G. Rasul, S. Ahmed, M. A. Sattar, and M. I. Jahirul, "Modelling and analysis of hydrodynamics and flow phenomena of fluid with formic acid as pollutant in the reactive area of a flat plate photocatalytic reactor with top and bottom turbulence promote," *Chem. Eng. J.*, vol. 466, no. March, p. 142760, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.142760.