Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia
24 (1), 2025, 59 – 67
DOI : 10.14710/jkli.68373
Available at https://ejournal.undip.ac.id/index.php/jkli



Kinetika Degradasi Air Limbah Menggunakan Media Tutup Botol Plastik PET dengan Reaktor Aerobik MBBR

Muliyadi Muliyadi[1*], Purwanto Purwanto[2], Sri Sumiyati[3], Budiyono Budiyono[2], Sudarno Sudarno[3], Budi Warsito[4]

[1]Program Pascasarjana Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
[2]Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
[3]Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
[4]Departemen Statistika Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
[*] Corresponding author: muliyadi.dosenternate@gmail.com

Info Artikel:Diterima 22 November 2024 ; Direvisi 26 Desember 2024 ; Disetujui 29 Desember 2024
Tersedia online : 15 Januari 2025 ; Diterbitkan secara teratur : Februari 2025

Cara sitasi: Muliyadi M, Purwanto P, Sumiyati S, Budiyono B, Sudarno S, Warsito B. Kinetika Degradasi Air Limbah Menggunakan Media Tutup Botol Plastik PET dengan Reaktor Aerobik MBBR. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2025 Feb;24(1):59-67. https://doi.org/10.14710/jkli.68373.

ABSTRAK

Latar belakang: Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis laju kinetika degradasi pengolahan air limbah biologi menggunakan model Michaelis-Menten dan regresi linier.

Metode: Jenis penelitian ini adalah eksperimen. Sampel diambil dengan teknik grab sample dan diambil pada 4 titik dengan jumlah 70 liter yang dibagi sama rata pada tiap titik. Penentuan model dilakukan dengan menggunakan persamaan Michaelis-Menten dan regresi linier. Reaktor terbuat dari fiberglass, berukuran panjang 40 cm, lebar 40 cm, tinggi 50 cm, dan tebal 4 mm. Reaktor memiliki kapasitas 80 L. Inlet dan Outlet air limbah dirancang dengan menggunakan pipa PVC. Percobaan dijalankan selama 30 hari. Total luas permukaan semua media adalah 14.130 cm^2. Analisis data menggunakan uji regresi linear dan persamaan michaelis-menten.

Hasil: Hasil pemodelan persamaan Michaelis-Menten menunjukkan nilai R2 mendekati sempurna, yang menunjukkan kedekatan dengan kondisi lapangan sebenarnya. Kondisi aerobik berlangsung lebih lama dan memungkinkan terjadinya degradasi BOD, COD, dan TSS. Konstanta Menten untuk menghilangkan BOD, COD, dan TSS masing-masing adalah 17,7, 80,5, dan 135. Nilai R2 yang diperoleh dengan menggunakan model regresi linier mendekati angka sempurna, yaitu untuk parameter BOD (0,995), COD (0, 9934), dan TSS (0,9665). dengan nilai y masing-masing -0,0613, -0,0467, -0,042. Persamaan yang diperoleh dari hasil pemodelan regresi adalah Y = 31,245-0,030X1 + 0,015X2 + 0,044X3 + e.

Simpulan: Model yang digunakan mampu memprediksi secara akurat degradasi BOD, COD, dan TSS dalam kondisi aerobik. Studi ini menyarankan pengoptimalan kondisi aerobik dalam praktik pengolahan air limbah untuk meningkatkan efisiensi penghilangan BOD, COD, dan TSS, menggunakan model Michaelis-Menten untuk pengurangan polutan yang efektif. Besarnya gelembung udara yang dihasilkan aerator tidak dikontrol sehingga tidak dapat dimaksimalkan laju aliran udara yang masuk pada reaktor yang mungkin akan berpengaruh pada hasil kerja reaktor. Penelitian ini meningkatkan pengetahuan pengolahan air limbah dengan menunjukkan efektivitas model Michaelis-Menten dalam menganalisis laju degradasi dan menekankan penggunaan media plastik, sehingga menawarkan wawasan berharga untuk penelitian masa depan.

Kata kunci: Kinetika Degradasi; Limbah Cair; Polutan; Reaktor; Aerobik

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

ABSTRACT

Title: Wastewater Degradation Kinetics Using PET Plastic Bottle Capping Media with MBBR Aerobic Reactor

Background: *The purpose of this study was to analyze the rate of degradation kinetics of biological wastewater treatment using the Michaelis-Menten model and linear regression.*

Method: *This type of research is experimental. Samples were taken using the grab sample technique and taken at 4 points with a total of 70 liters divided equally at each point. Model determination was carried out using the Michaelis-Menten equation and linear regression. The reactor was made of fiberglass, measuring 40 cm long, 40 cm wide, 50 cm high, and 4 mm thick. The reactor has a capacity of 80 L. The wastewater inlet and outlet were designed using PVC pipes. The experiment was run for 30 days. The total surface area of all media was 14,130 cm2. Data analysis used linear regression tests and the Michaelis-Menten equation.*

Results: *The results of the Michaelis-Menten equation modeling showed an R2 value close to perfect, which indicated closeness to actual field conditions. Aerobic conditions lasted longer and allowed for degradation of BOD, COD, and TSS. Menten's constants for removing BOD, COD, and TSS were 17.7, 80.5, and 135, respectively. The R2 value obtained using the linear regression model approached the perfect number, namely for the parameters BOD (0.995), COD (0.9934), and TSS (0.9665). with y values of -0.0613, -0.0467, -0.042, respectively. The equation obtained from the results of the regression modeling is Y = 31.245-0.030X1 + 0.015X2 + 0.044X3 + e.*

Conclusion: *The model used is able to accurately predict the degradation of BOD, COD, and TSS under aerobic conditions. This study suggests optimizing aerobic conditions in wastewater treatment practices to improve the efficiency of BOD, COD, and TSS removal, using the Michaelis-Menten model for effective pollutant reduction. The size of the air bubbles produced by the aerator is not controlled so that the rate of air flow entering the reactor cannot be maximized, which may affect the results which could minimize the reactor's working time. This study enhances the knowledge of wastewater treatment by demonstrating the effectiveness of the Michaelis-Menten model in analyzing degradation rates and emphasizing the use of plastic media, thus offering valuable insights for future research.*

Keywords: Degradation Kinetics; Wastewater; Pollutants; Reactors; Aerobic

PENDAHULUAN

Sampah organik, nitrogen, fosfor, dan patogen (virus dan bakteri) merupakan polutan berbahaya dalam air limbah domestic.[1] Beberapa faktor, termasuk suhu dan cuaca, mempengaruhi jumlah air limbah domestik yang dihasilkan. Menurut beberapa penelitian, kualitas air dipengaruhi oleh cuaca.[2] Cuaca juga mempengaruhi kondisi instalasi pengolahan air limbah. Aklimatisasi yang lama dan nitrifikasi yang buruk diketahui dipengaruhi oleh suhu rendah.

Produksi sampah plastik global mencapai 141 juta metrik ton pada tahun 2015. Polusi tanah, air, dan udara dapat disebabkan oleh sampah kemasan plastik yang terkubur di tempat pembuangan sampah.[3] Karena luas permukaannya yang besar untuk pembentukan biofilm, jenis tutup botol plastik PET ini dapat digunakan sebagai media penyaring atau sebagai alternatif kerikil dalam pengolahan air limbah. Mirip dengan kebanyakan plastik, PET adalah polimer berbasis minyak bumi yang terurai secara perlahan di lingkungan. Botol PET dibuang sebagai wadah sekali pakai setelah penggunaan awal.[4] Artinya, diperlukan metode yang mengubah sisa tutup botol plastik PET menjadi sumber daya yang berharga setelah penggunaan awal. Tutup botol PET diharapkan dapat digunakan dalam biofiltrasi untuk memecah senyawa organik dan kontaminan dalam air limbah serta mengurangi limbah plastik dengan berfungsi sebagai media baru bagi pertumbuhan bakteri.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi media plastik PET sebagai media pertumbuhan bakteri dalam reaktor biofilter. COD air limbah dapat dikurangi hingga 76% menggunakan biofilter dengan media plastik. Dengan persentase pembersihan sebesar 92,57%, media plastik (Sweetwater SWX Bio-media, Pentair), yang digunakan sebagai biofilter, juga diketahui dapat menghilangkan nitrat dari air limbah.[5] Sebaliknya, Dorji et al. mengungkapkan bahwa penggunaan media plastik dalam reaktor biofilter selama 40 hari mengurangi TSS sebesar 80%, Escherichia coli sebesar 84,6–92,4%, BOD sebesar 60–90%, dan COD sebesar 29–72%.[6] Penggunaan tutup botol plastik PET sebagai media pertumbuhan bakteri dalam reaktor biofilter tidak hanya memberikan solusi untuk pengolahan air limbah, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi pencemaran plastik. Dengan memanfaatkan limbah plastik yang biasanya sulit terurai, seperti tutup botol PET, sebagai media biofilter, kita dapat mengurangi jumlah plastik yang berakhir di tempat pembuangan akhir atau mencemari lingkungan. Hal ini sejalan dengan upaya global untuk mengurangi penggunaan plastik sekali pakai dan meningkatkan daur ulang.[7]

Sementara banyak penelitian berfokus pada pengolahan air limbah dengan pendekatan konvensional, penelitian ini menekankan penggunaan model matematis untuk memprediksi laju degradasi, yang memberikan pendekatan baru dalam analisis pengolahan air limbah. Hal ini sejalan dengan tren penelitian saat ini yang berusaha

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

mengintegrasikan model matematis dengan praktik pengolahan air limbah untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses.[8] Lebih lanjut, penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan media plastik dalam reaktor dapat memberikan keuntungan tambahan dalam hal stabilitas dan efisiensi proses biologis. Penelitian oleh Donkadokula et al. menunjukkan bahwa penggunaan media biofilm dapat meningkatkan efisiensi penghilangan BOD dalam sistem aerobic.[9] Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pemahaman tentang laju degradasi dalam pengolahan air limbah, tetapi juga membuka jalan bagi penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan media alternatif dalam sistem pengolahan.

Pendekatan biofilm terhadap pengolahan air limbah telah menjadi lebih umum dalam beberapa tahun terakhir sebagai sarana untuk mengurangi nutrisi dan bahan organik di pabrik pengolahan air limbah.[10] Misalnya, telah ditemukan bahwa bioreaktor film tetap menawarkan manfaat dibandingkan sistem pertumbuhan tersuspensi.[11] Lebih sedikit lumpur yang dihasilkan karena biofilm yang tumbuh pada media pendukung lebih kecil kemungkinannya untuk terbuang dari sistem pemrosesan karena beban hidrolik dan organik. Mengenai efektivitas penghilangan bahan organik dan nutrisi, teknologi film tetap bekerja lebih baik daripada teknik suspensi. Keunggulan ini menjadikan penggunaan media pendukung untuk penempelan biofilm selama pengolahan air limbah biologis sebagai strategi yang ekonomis.[12]

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis laju kinetika degradasi pengolahan air limbah biologi menggunakan model Michaelis-Menten dan regresi linier. Kami berharap bahwa hasil ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang efisiensi pengolahan limbah biologi menggunakan kedua model ini. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan rekomendasi model penerapan yang lebih efektif untuk meningkatkan kinerja sistem pengolahan limbah air. Hasil penelitian ini dapat membantu para praktisi pengolahan limbah cair untuk memilih model yang paling efektif dalam meningkatkan efisiensi proses pengolahan limbah biologi. Selain itu, rekomendasi dari penelitian ini juga dapat mempengaruhi pembuatan kebijakan lingkungan yang lebih efektif dalam mengatur pengelolaan air limbah secara keseluruhan.

MATERI DAN METODE

Pemodelan dan desain penelitian

Persamaan Michaelis-Menten dan regresi linier digunakan untuk menggambarkan model hasil eksperimen. Regresi dilakukan pada setiap variabel untuk menentukan model matematika. Regresi logaritmik digunakan jika grafik yang ditampilkan bersifat asimtotik dan linier. Penelitian ini menguji tiga parameter: total padatan tersuspensi, COD dan BOD. Air limbah rumah tangga digunakan dalam penelitian ini. Meskipun uji hasil pengolahan dilakukan untuk kedua jenis air limbah, pengujian awal dilakukan dengan menggunakan air limbah langsung dari sumber polutan. Penentuan model didasarkan pada variabel-variabel yang mempengaruhi sebab akibat penurunan nilai BOD, COD, dan TSS. Uji$\beta 1=0$ vs $\beta 1\neq 0$ hingga Regresi Linier Berganda. Hasil model persamaan regresi dapat digunakan sebagai panduan untuk memprediksi hubungan antara variabel di luar data yang diambil sampelnya dalam suatu populasi. Penentuan parameter kinetik menggunakan persamaan Michaelis-Menten dilakukan dengan melihat variasi konsentrasi substrat yaitu BOD, COD, dan TSS yang dihasilkan selama pengolahan air limbah. Pada persamaan Michaelis-Menten: m maks jika kecepatan reaksi awal sama persis dengan setengah kecepatan maksimum maka diperoleh

$$\text{Km} = [\text{S}]_{\text{Vo}} = \frac{Vmaks(S)}{S+KM}$$

Penerapan kinetika Michaelis-Menten dan analisis regresi dalam penelitian pengolahan air limbah menyediakan kerangka kerja untuk memahami dan mengoptimalkan pengolahan polutan organik. Kemampuan untuk memodelkan interaksi antara BOD, COD, dan TSS, beserta penggunaan metode statistik untuk analisis data, meningkatkan kemampuan prediktif proses pengolahan air limbah, yang pada akhirnya mengarah pada hasil lingkungan yang lebih baik.[13,14]

Sampling

Penelitian dilakukan di bulan Mei hingga Juli 2024. Pengambilan sampel dilakukan di saluran pembuangan air limbah (parit) yang berada di sekitar wilayah penelitian. Titik koordinat pengambilan sampel yaitu -1.368788, 116.649916. Sampel diambil dengan teknik grab sample dan diambil pada 4 titik dengan jumlah 70 liter yang dibagi sama rata pada tiap titik. Penentuan model dilakukan dengan menggunakan persamaan Michaelis-Menten dan regresi linier. Parameter yang diuji pada penelitian ini adalah BOD, COD, TSS, suhu, dan pH. Pengambilan sampel untuk pengujian dilakukan dalam kondisi steady state. Pengambilan air limbah langsung dilakukan pada parit tempat pembuangan air limbah oleh masyarakat yang ada di sekitar wilayah penelitian dengan menggunakan metode yang terstandarisasi oleh SNI 6989.59:2008 Tentang Air dan air limbah – Bagian 59: Metode pengambilan contoh air limbah.

Reaktor

Reaktor berukuran panjang 40 cm, lebar 40 cm, tinggi 50 cm, dan tebal 4 mm. Reaktor ini dibangun menggunakan fiberglass. Volume reaktor dipertahankan pada 80 liter. Pipa PVC digunakan untuk mendesain masukan dan keluaran air limbah. Tangki primer menampung 1,6 L mikroorganisme lokal, 70 L air limbah, dan 8,4 L bahan reaktor aerob. Tutup botol plastik PET berukuran sedang berdiameter 3 cm dan luas permukaan 28,26 cm ditempatkan. 14.130 sentimeter adalah total luas permukaan semua

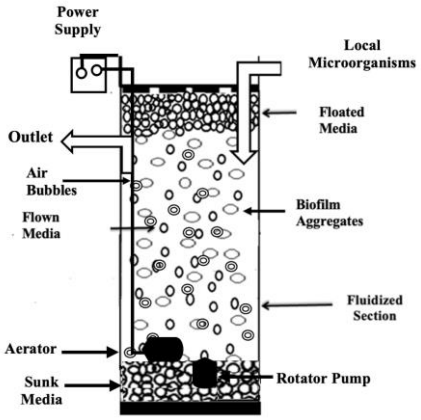
Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

media ditambah luas permukaan setiap media (500 tutup botol plastik per reaktor × 28,26 cm). Reaktor dibangun di dalam greenhouse. Untuk memastikan reaktor berfungsi sesuai rencana, uji desain reaktor dilakukan untuk menentukan apakah reaktor sesuai dengan keadaan dan metode yang digunakan dalam penelitian ini. Reaktor kemudian diberi bioaktivator yang terbuat dari limbah kulit buah yang difermentasi yang telah berubah menjadi cair dan mengandung mikroorganisme, seperti ragi dan bakteri. Cairan fermentasi ini disebut sebagai mikroba lokal. Data yang dikumpulkan kemudian dimasukkan ke dalam basis data dan grafik dibuat untuk setiap titik data.

Operasi Reaktor

Reaktor dijalankan selama 30 hari dengan kondisi batch. Media dan air limbah dicampur kemudian bioaktivator MOL dimasukkan. Tindakan ini digunakan untuk mempercepat perkembangan mikroba dalam air limbah. Struktur biofilm pada media biofilter menebal selama aklimatisasi. Proses aklimatisasi selesai ketika konsentrasi kontaminan menurun. Bioaktivator ini adalah bakteri alami yang diperoleh dari limbah organik. Pembentukan biofilm dimulai pada hari ketiga, yang juga dianggap sebagai waktu terbaik untuk membedakan BOD selama tujuh hari pertama. Pengukuran BOD, COD, TSS, pH dan Suhu dilakukan setiap hari pada pukul 9 pagi. Sampel diambil sebanyak 1 liter setiap harinya lalu dikirim ke laboratorium untuk pengukuran parameter pencemar (BOD, COD dan TSS). Sedangkan pengukuran pH dan suhu dilakukan di tempat. Setelah 30 hari berjalannya reaktor dilakukan analisis SEM. Biofilm berukuran 1 cm dipotong untuk pemeriksaan menggunakan pemindaian mikroskop elektron (SEM). Sampel-sampel tersebut pertama-tama difiksasi dengan impregnasi formaldehida. Selanjutnya, untuk mencegah penyusutan, sampel-sampel biofilm direndam dalam etanol 20, 40, 60, 80, dan 100% selama beberapa waktu sebelum dikeringkan. Menggunakan perangkat penyemprot ion, sampel-sampel yang telah kering disemprot dengan emas untuk meningkatkan konduktivitas, dan kemudian dilakukan pencitraan SEM. Berkas elektron berenergi tinggi ditembakkan oleh meriam elektron ke dalam sampel-sampel konduktif yang ditempatkan pada panggung sampel SEM saat sampel-sampel tersebut berada dalam kondisi vakum. Citra tiga dimensi dibuat dengan memperkuat sinyal berkas elektron dan mengirimkannya ke monitor.

SEM digunakan untuk memvisualisasikan biofilm yang telah berkembang pada permukaan media tutup botol plastik, seperti yang terlihat pada Gambar 2 (pada reactor aerob). Gambar SEM diperoleh pada perbesaran 500X dan 5.000X. Tampilan atas biofilm yang telah berkembang pada media pembawa pada perbesaran 500X ditampilkan pada Gambar 2a. Biofilm bakteri yang terbentuk dengan baik terlihat pada permukaan media menurut data SEM. Satu bakteri yang mengambang bebas mendarat di permukaan, sel-sel bakteri berkumpul dan menempel, bakteri tumbuh dan membelah untuk membuat biofilm, pembentukan biofilm dewasa, dan biofilm tertentu menyebar untuk melepaskan bakteri yang mengambang bebas untuk kolonisasi tambahan adalah lima tahap pertumbuhan biofilm. Biofilm terbentuk sepenuhnya dan secara efisien menghilangkan bahan organik setelah periode aklimatisasi. Gambar 2b menunjukkan biofilm dewasa yang telah membentuk polisakarida yang khas. Pada titik ini, sel-sel mulai terpisah dan berubah kembali menjadi sel-sel planktonik, yang menempel pada permukaan baru untuk membentuk lapisan biofilm baru. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Skema Sistem Eksperimen Reaktor Aerobik Menggunakan Media Tutup Botol Plastik

Analisis Parameter Pencemar

Analisis konsentrasi BOD mengikuti standar SNI 6989.72.2009. Pengujian BOD dilakukan pada suhu 20^0 C selama 5 hari. Sampel yang sudah ditempatkan di botol sampel kemudian diuji dengan menambahkan larutan pengencer yang bersifat jenuh oksigen. Larutan pengencer tersebut sebelumnya telah ditambahkan larutan nutrisi dan bibit mikroba. Selanjutnya sampel diinkubasi pada suhu 20^0C selama 5 hari. Nilai BOD dihitung berdasarkan selisih konsentrasi oksigen terlarut 0 hari dan 5 hari. Bahan kontrol standar yang digunakan dalam uji BOD ini adalah larutan glukosa dan asam glutamat.

Uji konsentrasi COD mengacu pada SNI 6989.2:2009 tentang Air dan air limbah – Bagian 2: Cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (chemical oxygen demand, COD) dengan refluks tertutup secara spektrofotometri.

Uji TSS menggunakan standar SNI 06-6989.3-2004 tentang air dan air limbah – bagian 3: cara uji padatan tersuspensi total (total suspended solid, TSS) secara gravimetri.

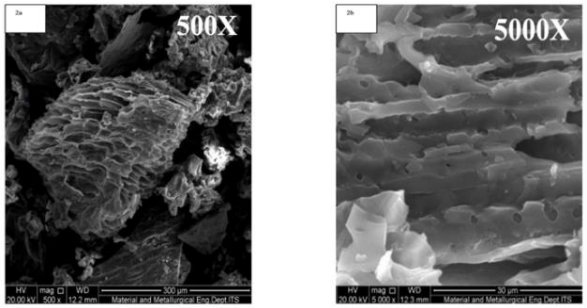
Uji suhu mengacu pada SNI 06-6989.23-2005 tentang standar pengujian air dan limbah air – bagian 23: cara uji suhu dengan termometer

Uji pH mengacu pada SNI 06-6989.11-2004 tentang cara uji derajat keasaman (pH) dengan menggunakan alat pH meter.

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

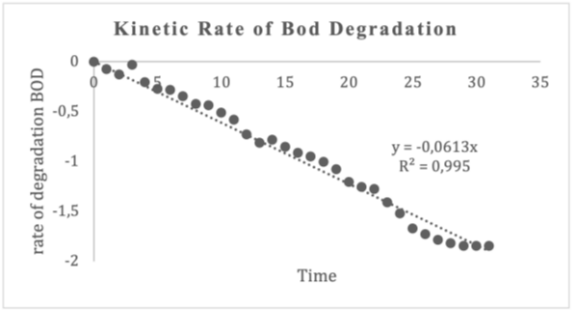
HASIL DAN PEMBAHASAN

Biofilm berukuran 1 cm diperiksa menggunakan mikroskop elektron pemindaian (SEM). Sampel difiksasi dengan formaldehida dan direndam dalam berbagai konsentrasi etanol untuk mencegah penyusutan. Sampel disemprot dengan emas, dan gambar SEM diperoleh. Biofilm diamati pada perbesaran yang berbeda, menunjukkan lima tahap pertumbuhan: pendaratan bakteri tunggal, agregasi sel bakteri, pembentukan biofilm matang, dan penyebaran. Setelah aklimatisasi, biofilm terbentuk sepenuhnya dan bahan organik dihilangkan. Detail dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Analisis SEM terhadap biofilm yang terbentuk pada permukaan media

Berikut ini adalah hasil pemodelan persamaan Michaelis-Menten. Dari Gambar 3 juga dapat diamati bahwa model yang dihasilkan memiliki nilai R2 yang mendekati sempurna. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model tersebut semakin mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Selain itu, laju kinetika degradasi memerlukan waktu 25 hari untuk mencapai kondisi stabil pada paramater BOD, COD, dan TSS. Nilai konstanta Menten yang diperoleh dari model Menten untuk masing-masing parameter adalah, dan konstanta Menten untuk penyisihan BOD pada kondisi aerobik adalah 17,7 dengan y = -0,0613x. Konstanta Menten untuk penyisihan COD pada kondisi aerobik adalah 80,5 dengan nilai y = -0,0467x. Konstanta Menten untuk penyisihan TSS pada kondisi aerobik adalah 135 dengan nilai y = -0,042x. Untuk lebih jelasnya lihat Gambar 3.

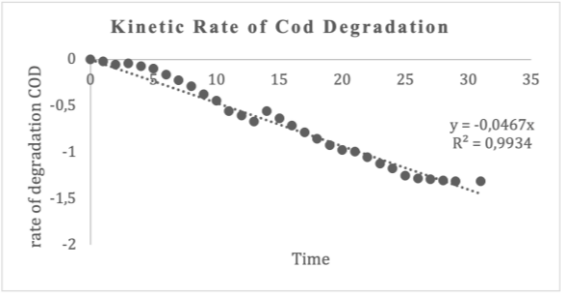


3a

Persamaan M Menten

$$V0 = \frac{Vmaks(S)}{S + KM}$$

= (Vm.S0) - (V0.S0) / V0KM
Km = (0,0668,197) - (0,0613,197) / 0,0613
KM=17,7

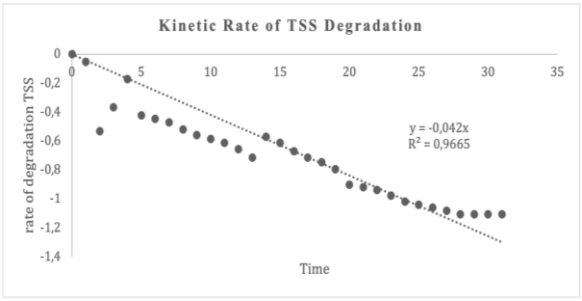


3b

Persamaan M Menten

$$V0 = \frac{Vmaks(S)}{S + KM}$$

= (Vm.S0) - (V0.S0) / V0KM
Km = (0,0702,197) - (0,0498,197) / 0,0498
KM = 80,5



3c

Persamaan M Menten

$$V0 = \frac{Vmaks(S)}{S + KM}$$

= (Vm.S0) - (V0.S0) / V0KM
Km = (0,0848,133) - (0,042,133) / 0,042
KM = 135

Gambar 3. Laju kinetik degradasi BOD, COD, dan TSS menggunakan model Michaelis Menten

Tabel 1. Model Regresi Linier Penurunan dan Perbedaan Nilai BOD, COD, dan TSS pada Reaktor Biofilter

Parameter	Persamaan	
	Aerob	R2
BOD	Y= -0,0613	0,995
COD	Y= -0,0467	0.9934
TSS	Y= -0,042	0,9665

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai R2 yang diperoleh dengan menggunakan model regresi linier sudah mendekati nilai sempurna untuk parameter BOD (0,995), COD (0,9934), dan TSS (0,9665). dengan nilai y berturut-turut sebesar -0,0613, -0,0467, -0,042. Hal ini tidak jauh berbeda dengan model yang ditunjukkan pada model Michaelis–Menten. Persamaan yang diperoleh dari hasil pemodelan regresi adalah Y = 31,245-0,030X1 + 0,015X2 + 0,044X3 + e.

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

Model laju kinetik degradasi pada Tabel 2 menunjukkan pengaruh searah antara variabel pH dan suhu. Nilai konstanta positif sebesar 6,975 menunjukkan hubungan konstan antara variabel tersebut. Peningkatan BOD sebesar 1% mengakibatkan penurunan suhu sebesar 1%. Peningkatan COD sebesar 1% menurunkan pH sebesar -0,010, sedangkan peningkatan TSS sebesar 1% mengakibatkan peningkatan TSS sebesar 1%.

Tabel 2. Hasil analisis pengaruh kelembaban dan suhu terhadap kadar BOD, COD, dan TSS

Variabel Independen		Tingkat keasaman (pH)	Suhu
Konstanta		6.975	31.245
Variabel Terikat	BOD	0,005	-0,030
	COD	-0,010	0,015
	TSS	0,001	0,044
Persamaan Model		Y = 6,975 + 0,005X1 -0,010X2 + 0,001X3 + e	Y= 31,245-0,030X1+0,015X2+0,044X3+e
R2		0.266	0.830

PEMBAHASAN

Dalam analisis model yang dihasilkan pada Gambar 3, terlihat bahwa nilai R^2 mendekati satu, yang menunjukkan bahwa model tersebut memiliki kemampuan prediksi yang sangat baik dalam menggambarkan kondisi nyata di lapangan. Hal ini menunjukkan bahwa model tersebut dapat diandalkan untuk memahami dan mengelola tingkat polusi dalam skenario dunia nyata. Laju degradasi yang diamati pada kondisi aerobik selama 30 hari menunjukkan penurunan pencemaran yang stabil, tetapi ini juga dapat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti variasi iklim, aktivitas manusia, dan kondisi lingkungan lainnya.

Keakuratan model dalam memprediksi kinetika degradasi dalam kondisi aerobik sangat mengesankan, tetapi harus diingat bahwa model ini hanya seakurat data yang digunakan untuk membangunnya. Ketidakpastian dalam data input dapat menyebabkan "regresi pengenceran," di mana hubungan yang sebenarnya antara variabel dapat terdistorsi.[15] Oleh karena itu, penggunaan metode statistik yang lebih canggih, seperti model campuran efek, dapat membantu meningkatkan akurasi prediksi dengan mempertimbangkan variasi dalam data.[16]

Dalam kondisi aerobik, bakteri lebih aktif dalam mendegradasi bahan organik dibandingkan dalam kondisi anaerobik.[17] Hal ini dikarenakan bakteri aerob membutuhkan oksigen untuk memecah bahan organik secara efisien, sedangkan bakteri anaerob hanya dapat bertahan hidup di lingkungan yang kekurangan oksigen.[18]Dekomposisi aerobik biasanya menghasilkan produksi karbon dioksida dan air sebagai produk sampingan.[19] Hal ini dapat menghasilkan efisiensi pemrosesan yang lebih baik, tetapi juga memerlukan konsumsi energi yang lebih tinggi. Hal ini karena oksigen membantu meningkatkan aktivitas bakteri selama degradasi.[20] Reaktor aerobik memiliki tingkat pengolahan limbah yang lebih stabil dan efektif daripada reaktor anaerobik. Meskipun biaya operasionalnya lebih tinggi, hasil akhirnya lebih baik dalam jangka panjang.[21]

Penemuan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa kondisi aerobik mendukung aktivitas mikroba yang lebih tinggi dalam proses degradasi bahan organik dibandingkan dengan kondisi anaerobik.[22] Dalam konteks ini, bakteri aerobik berfungsi secara optimal karena mereka memerlukan oksigen untuk memecah bahan organik dengan efisien. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa bakteri aerobik memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa kompleks dengan lebih baik, menghasilkan produk sampingan seperti karbon dioksida dan air, yang menunjukkan efisiensi proses yang lebih tinggi.[23] Sebaliknya, bakteri anaerobik, yang beroperasi dalam kondisi tanpa oksigen, memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan dan efisiensi degradasi.[22] Dari sudut pandang teknis, reaktor aerobik menunjukkan stabilitas yang lebih baik dalam pengolahan limbah. Hal ini disebabkan oleh keberadaan oksigen yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroba, yang pada gilirannya meningkatkan laju degradasi polutan.[24]

Penelitian lain menunjukkan bahwa dalam kondisi aerobik, komunitas mikroba menjadi lebih beragam dan aktif, yang berkontribusi pada efisiensi proses pengolahan limbah.[25] Meskipun reaktor anaerobik dapat berfungsi dalam kondisi tertentu, mereka sering kali tidak dapat mencapai tingkat efisiensi yang sama dalam pengolahan limbah yang kompleks.[26] Ini menunjukkan bahwa pemilihan kondisi pengolahan yang tepat sangat penting untuk mencapai hasil yang diinginkan dalam pengelolaan limbah.

Secara keseluruhan, model yang menunjukkan keakuratan tinggi dalam memprediksi kinetika degradasi dalam kondisi aerobik merupakan alat yang sangat berharga untuk memahami dan mengelola tingkat polusi dalam skenario dunia nyata. Dengan memanfaatkan kondisi aerobik, kita dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah, mengurangi dampak lingkungan, dan mendukung keberlanjutan ekosistem. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensi kombinasi antara proses aerobik dan anaerobik untuk mencapai hasil yang lebih baik dalam pengolahan limbah yang kompleks.[24]

Dengan menggunakan model Michaelis-Menten, laju degradasi maksimum untuk BOD (gambar 3a) adalah Y = -0,0613 dan R2 = 0,995. Laju degradasi maksimum untuk parameter COD (gambar 3b) adalah Y = -0,0467 dan R2 = 0,9934, dan degradasi TSS (gambar 3c) adalah Y = -0,042 dan R2 = 0,9665. Hal ini menyoroti kebutuhan oksigen untuk memecah

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

polutan organik. Oksigen diketahui memiliki dampak yang menguntungkan pada pengolahan limbah cair karena proses oksidasi dapat membantu memecah bahan kimia organik yang ada dalam limbah.[27] Oksigen juga dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam penguraian limbah cair. [28] Oleh karena itu, penggunaan oksigen dalam pengolahan limbah cair dapat mempercepat degradasi senyawa organik dan mengurangi pencemaran lingkungan.[29] Oksigen merupakan komponen penting dalam sistem pengolahan air limbah biologis.[30] Oleh karena itu, penggunaan oksigen dalam pengolahan limbah cair sangat dianjurkan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengolahan limbah.

Dekomposisi polutan dalam air limbah terjadi lebih cepat dan efisien dengan adanya oksigen.[31] Dengan demikian, pemanfaatan oksigen dalam pengolahan limbah cair dapat membantu mengurangi risiko pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh limbah tersebut. Reaksi kimia yang terjadi dalam pengolahan limbah cair juga dapat berlangsung lebih optimal dengan adanya oksigen, sehingga mempercepat degradasi senyawa berbahaya.[32] Penggunaan oksigen juga dapat membantu memenuhi standar regulasi untuk pengolahan air limbah, memastikan bahwa limbah yang dilepaskan ke lingkungan berada dalam batas yang dapat diterima.[33] Penggabungan oksigen ke dalam pengolahan limbah cair dapat menghasilkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk mengelola polutan.

Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mencakup eksplorasi lebih lanjut mengenai interaksi antara proses aerobik dan anaerobik dalam pengolahan limbah, serta pengembangan model yang lebih kompleks yang dapat memprediksi perilaku sistem dalam kondisi yang bervariasi. Penelitian ini dapat mencakup pengujian berbagai kombinasi kondisi operasional untuk menentukan pengaruhnya terhadap efisiensi pengolahan limbah. Selain itu, penting untuk mengeksplorasi penggunaan teknologi baru, seperti kontaktor biologis berputar, yang dapat meningkatkan laju degradasi dan efisiensi pengolahan limbah.

SIMPULAN

Baik pH maupun suhu memiliki efek positif dan negatif pada laju degradasi. Peningkatan BOD sebesar 1% mengakibatkan penurunan suhu sebesar 1%. Peningkatan COD sebesar 1% mengakibatkan penurunan pH sebesar -0,010, sedangkan peningkatan TSS sebesar 1% mengakibatkan peningkatan pH sebesar 0,001. Koefisien regresi untuk BOD, COD, dan TSS menunjukkan hubungan negatif dan positif antara variabel-variabel tersebut. Tanda positif menunjukkan hubungan searah, sedangkan tanda negatif menunjukkan hubungan yang berlawanan arah. Hasil pemodelan persamaan Michaelis-Menten menunjukkan nilai R2 mendekati sempurna, yang menunjukkan kedekatan dengan kondisi lapangan yang sebenarnya. Kondisi aerobik berlangsung lebih lama dan memungkinkan terjadinya degradasi BOD, COD, dan TSS. Konstanta Menten untuk penghilangan BOD, COD, dan TSS masing-masing adalah 17,7, 80,5, dan 135.Nilai R2 yang diperoleh dengan menggunakan model regresi linier sudah mendekati angka sempurna yaitu untuk parameter BOD (0,995), COD (0,9934), dan TSS (0,9665). dengan nilai y berturut-turut sebesar -0,0613, -0,0467, -0,042. Persamaan yang diperoleh dari hasil pemodelan regresi adalah Y = 31,245-0,030X1 + 0,015X2 + 0,044X3 + e. Kinerja reaktor dapat terpengaruh karena ketidakmampuan aerator untuk mengatur ukuran gelembung udara mencegah laju aliran udara yang masuk ke reaktor menjadi maksimal. Dengan menunjukkan seberapa baik model Michaelis-Menten menganalisis laju degradasi dan menyoroti penggunaan media plastik, studi ini memajukan pemahaman kita tentang pengolahan air limbah dan memberikan informasi yang mendalam untuk penelitian lebih lanjut. Investigasi tambahan terhadap interaksi antara proses aerobik dan anaerobik dalam pengolahan air limbah disarankan, seperti halnya pembuatan model yang semakin rumit yang dapat memperkirakan perilaku sistem dalam berbagai skenario. Pengujian berbagai kombinasi parameter operasi untuk memastikan dampaknya terhadap efisiensi pengolahan air limbah dapat menjadi bagian dari studi ini. Lebih jauh, penting untuk menyelidiki penerapan teknologi baru yang dapat meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dan laju degradasi, seperti kontaktor biologis berputar. Teknologi ini telah terbukti dalam meningkatkan pembuangan bahan organik dan nutrisi dari air limbah, yang berpotensi mengarah pada metode pengolahan yang lebih berkelanjutan dan hemat biaya. Dengan menggabungkan kemajuan ini ke dalam penelitian dan praktik, efektivitas keseluruhan sistem pengolahan air limbah dapat ditingkatkan secara signifikan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih yang tulus kami haturkan kepada Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan dan Kementerian Kesehatan yang telah memberikan dukungan finansial dalam penelitian ini. Dukungan tersebut sangat berarti bagi kami, terutama dalam konteks pengembangan ilmu pengetahuan dan penerapan hasil penelitian untuk meningkatkan kualitas kesehatan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yesilay G, dos Santos OAL, A BR, et al. Impact of pathogenic bacterial communities present in wastewater on aquatic organisms: Application of nanomaterials for the removal of these pathogens. Aquatic Toxicology 2023;261(8):1–12; https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106620.
2. Kinnunen J, Rossi PM, Herrmann I, et al. Factors affecting effluent quality in on-site wastewater treatment systems in the cold climates of Finland and Sweden. J Clean Prod 2023;404(6):1–12; https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136756.

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

3. Benyathiar P, Kumar P, Carpenter G, et al. Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. Polymers (Basel) 2022;14(12):2366; https://doi.org/10.3390/polym14122366.
4. Muringayil Joseph T, Azat S, Ahmadi Z, et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 2024;9(6):1–16; https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673.
5. Paul D, Hall SG. Biochar and zeolite as alternative biofilter media for denitrification of aquaculture effluents. Water (Switzerland) 2021;13(19):1–13; https://doi.org/10.3390/w13192703.
6. Dorji U, Dorji P, Shon H, et al. On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: Pilot-scale study on effluent standards in Bhutan. Chemosphere 2022;286(P2):131729; https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131729.
7. Kan M, Wang C, Zhu B, et al. Seven decades of plastic flows and stocks in the United States and pathways toward zero plastic pollution by 2050. J Ind Ecol 2023;27(6):1538–1552; https://doi.org/10.1111/jiec.13427.
8. Singh SP, Sharma MK, Sarangi SK, et al. Feasibility of sequential anaerobic-aerobic integrated settler-based biofilm reactor for onsite treatment of domestic wastewater. Environ Res Commun 2023;5(12):1–12; https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad0e8e.
9. Donkadokula NY, Naz I, Kola AK, et al. Assessment of the aerobic glass beads fixed biofilm reactor (GBs-FBR) for the treatment of simulated methylene blue wastewater. Sci Rep 2020;10(1):1–14; https://doi.org/10.1038/s41598-020-77670-2.
10. Chattopadhyay I, J RB, Usman TMM, et al. Exploring the role of microbial biofilm for industrial effluents treatment. Bioengineered 2022;13(3):6420–6440; https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2044250.
11. Waqas S, Harun NY, Sambudi NS, et al. Effect of Operating Parameters on the Performance of Integrated Fixed-Film Activated Sludge for Wastewater Treatment. Membranes (Basel) 2023;13(8):704; https://doi.org/10.3390/membranes13080704.
12. Boltz JP, Daigger GT. A mobile-organic biofilm process for wastewater treatment. Water Environment Research 2022;94(9); https://doi.org/10.1002/wer.10792.
13. Wang X, Dong Y, Yu S, et al. Analysis of the Electricity Consumption in Municipal Wastewater Treatment Plants in Northeast China in Terms of Wastewater Characteristics. Int J Environ Res Public Health 2022;19(21):1–16; https://doi.org/10.3390/ijerph192114398.
14. Brose DA, Pluth TB, Grunwald P, et al. Assessment of statistical methods for converting biochemical oxygen demand and carbonaceous biochemical oxygen demand to total organic carbon in wastewater. Water and Environment Journal 2023;37(2):266–275; https://doi.org/10.1111/wej.12834.
15. Viljanen M, Tostrams L, Schoffelen N, et al. A joint model for the estimation of species distributions and environmental characteristics from point-referenced data. PLoS One 2024;19(6):1–27; https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304942.
16. Yin Y, Sameoto JA, Keith DM, et al. Improving estimation of length–weight relationships using spatiotemporal models. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 2022;79(11):1896–1910; https://doi.org/10.1139/cjfas-2021-0317.
17. Liu J, Liang J, Bravo AG, et al. Anaerobic and aerobic biodegradation of soil-extracted dissolved organic matter from the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region, China. Science of The Total Environment 2021;764:142857; https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142857.
18. Gayathri. Role of Aerobic and Anaerobic Bacteria in the Bioconversion of Lignocellulose waste material. Journal of Microbes and Research 2023;2(1); https://doi.org/10.58489/2836-2187/008.
19. Harirchi S, Wainaina S, Sar T, et al. Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. Bioengineered 2022;13(3):6521–6557; https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986.
20. Elyamine AM, Kan J, Meng S, et al. Aerobic and Anaerobic Bacterial and Fungal Degradation of Pyrene: Mechanism Pathway Including Biochemical Reaction and Catabolic Genes. Int J Mol Sci 2021;22(15):8202; https://doi.org/10.3390/ijms22158202.
21. Deng Z, Muñoz Sierra J, Ferreira ALM, et al. Effect of operational parameters on the performance of an anaerobic sequencing batch reactor (AnSBR) treating protein-rich wastewater. Environmental Science and Ecotechnology 2024;17:100296; https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100296.
22. Matturro B, Di Franca ML, Tonanzi B, et al. Enrichment of Aerobic and Anaerobic Hydrocarbon-Degrading Bacteria from Multicontaminated Marine Sediment in Mar Piccolo Site (Taranto, Italy). Microorganisms 2023;11(11):1–21; https://doi.org/10.3390/microorganisms11112782
23. Schmautz Z, Espinal CA, Bohny AM, et al. Environmental parameters and microbial community profiles as indication towards

Copyright © 2025 The Author. JKLI, ISSN: 1412-4939 – e-ISSN: 2502-7085.

microbial activities and diversity in aquaponic system compartments. BMC Microbiol 2021;21(1):1–11; https://doi.org/10.1186/s12866-020-02075-0.
24. Bucci P, Marin JCA, Zaritzky N, et al. Biological processes of nitrogen removal and modeling oxygen diffusion in flocculent sludge and in granular sequencing batch reactors. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 2023;98(2):404–418; https://doi.org/10.1002/jctb.7253.
25. Schmautz Z, Espinal CA, Bohny AM, et al. Environmental parameters and microbial community profiles as indication towards microbial activities and diversity in aquaponic system compartments. BMC Microbiol 2021;21(1):12–19; https://doi.org/10.1186/s12866-020-02075-0.
26. Rahman M, Islam M, Doza S, et al. Higher helminth ova counts and incomplete decomposition in sand-enveloped latrine pits in a coastal sub-district of Bangladesh. PLoS Negl Trop Dis 2022;16(6):1–12; https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0010495.
27. Kumari P, Kumar A. advanced oxidation process: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. Results in Surfaces and Interfaces 2023;11:100122; https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122.
28. Zalfiatri Y, Restuhadi F, Pramana A, et al. Development of microalgae and agrobost mutualism symbiotic technology in the aerobic treatment of sago refinery wastewater. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2023;1160(1):012074; https://doi.org/10.1088/1755-1315/1160/1/012074.
29. Gnowe WD, Noubissié E, Noumi GB. Influence of time and oxygenation on the degradation of organic matter, nitrogen and phosphates during the biological treatment of slaughterhouse effluent. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 2020;2:100048; https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100048.
30. Ganthavee V, Trzcinski AP. Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: a review. Environ Chem Lett 2024; https://doi.org/10.1007/s10311-024-01748-w.
31. Nishat A, Yusuf M, Qadir A, et al. Wastewater treatment: A short assessment on available techniques. Alexandria Engineering Journal 2023;76:505–516; https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.054.
32. Al-Nuaim MA, Alwasiti AA, Shnain ZY. The photocatalytic process in the treatment of polluted water. Chemical Papers 2023;77(2):677–701; https://doi.org/10.1007/s11696-022-02468-7.
33. Obaideen K, Shehata N, Sayed ET, et al. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. Energy Nexus 2022;7:100112; https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112.

©2025. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.