

KINETIKA REAKSI PERTUMBUHAN BAKTERI *PSEUDOMONAS FLUORESCENS* PADA PROSES FERMENTASI AIR LINDI

Ghany Firmansyah¹, Tuhu Agung Rachmanto², Rizka Novembrianto³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur,
Surabaya, Indonesia, 60294

¹ghanyfirmansyah05@gmail.com, ²tuhu.tl@upnjatim.ac.id, ³rizka.tl@upnjatim.ac.id

Abstrak: Air lindi merupakan limbah cair hasil dekomposisi sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang berpotensi mencemari lingkungan karena kandungan bahan organik dan logam beratnya yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinetika pertumbuhan bakteri *Pseudomonas fluorescens* serta karakteristik fisik hasil fermentasi air lindi. Proses fermentasi dilakukan secara aerob selama 8 hari dengan variasi volume inokulum bakteri 5 mL, 7 mL, dan 10 mL dalam 100 mL air lindi. Parameter yang diamati meliputi pH, suhu, konsentrasi C-organik, dan jumlah koloni bakteri. Hasil menunjukkan peningkatan pertumbuhan bakteri secara signifikan pada fase logaritmik dengan pola linear hubungan antara $\ln(C_{A0}/C_A)$ dan $\ln(C_C/C_{C0})$. Nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1, yang mengindikasikan kesesuaian dengan model kinetika pertumbuhan. Selain itu, terjadi penurunan kandungan C-organik dan logam berat, serta perubahan karakteristik fisik air lindi yang menunjukkan peningkatan kualitas hasil fermentasi. Dengan demikian, fermentasi air lindi menggunakan *Pseudomonas fluorescens* berpotensi mengurangi dampak pencemaran dan meningkatkan nilai guna air lindi sebagai hasil olahan ramah lingkungan.

Kata kunci: air lindi, bakteri, *Pseudomonas fluorescens*, fermentasi, kinetika pertumbuhan.

Abstrack: Leachate is a liquid waste generated from the decomposition of solid waste in landfill sites, which has the potential to pollute the environment due to its high content of organic matter and heavy metals. This study aims to analyze the growth kinetics of *Pseudomonas fluorescens* and the physical characteristics of leachate after the fermentation process. The fermentation was carried out aerobically for 8 days with variations of bacterial inoculum volumes of 5 mL, 7 mL, and 10 mL in 100 mL of leachate. The observed parameters included pH, temperature, C-organic concentration, and bacterial colony count. The results showed a significant increase in bacterial growth during the logarithmic phase, following a linear relationship between $\ln(C_{A0}/C_A)$ and $\ln(C_C/C_{C0})$. The determination coefficient (R^2) values were close to 1, indicating good conformity with the microbial growth kinetics model. In addition, there was a reduction in C-organic and heavy metal contents, as well as changes in the physical characteristics of the leachate, indicating improved quality of the fermentation product. Therefore, leachate fermentation using *Pseudomonas fluorescens* has the potential to reduce environmental pollution and enhance the usability of leachate as an environmentally friendly processed product.

Key word: fermentation, growth kinetics, leachate, *pseudomonas fluorescens* bacteria.

How to Cite

Ghany, F., Rachmanto, T.A., Novembrianto, R., 2026. Kinetika Reaksi Pertumbuhan Bakteri *Pseudomonas fluorescens* Pada Proses Fermentasi Air Lindi. *Biolova* 7(1). 74-85.

Air lindi adalah jenis limbah cair yang terbentuk sebagai akibat dari proses perkolasi atau perembesan air hujan melalui tumpukan sampah yang ada di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), di mana air tersebut membawa serta berbagai senyawa organik, senyawa anorganik, amonia, serta logam berat dalam konsentrasi yang sangat tinggi, sehingga berpotensi untuk mencemari tanah dan juga badan air di sekitar lokasi tersebut (Permono, 2024). Komposisi dari air lindi ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti usia dari timbunan sampah tersebut, jenis bahan organik yang terkandung di dalamnya, tingkat curah hujan di daerah tersebut, serta sistem pengelolaan yang diterapkan secara spesifik di TPA (Murtafaqoh, 2022).

Secara umum, air lindi ini memiliki nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang sangat tinggi, di samping kandungan nitrogen dan fosfor yang cukup signifikan, yang dapat menyebabkan terjadinya eutrofikasi apabila air lindi tersebut dibuang langsung ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan yang memadai (Kurniawan et al., 2021). Peningkatan volume sampah yang terjadi di daerah perkotaan tanpa adanya pengelolaan lindi yang cukup baik dan memadai dapat menimbulkan risiko pencemaran lingkungan yang sangat signifikan, serta berpotensi mengganggu kesehatan masyarakat yang tinggal di sekitar area tersebut (Sharma et al., 2022).

Salah satu metode penanganan yang dianggap berpotensi ramah lingkungan adalah melalui proses fermentasi biologis dengan menggunakan bakteri pengurai organik, seperti *Pseudomonas fluorescens*, yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa-senyawa kompleks menjadi

bentuk yang lebih sederhana melalui serangkaian reaksi oksidasi dan juga reaksi enzimatik (Probowati et al., 2021; Asril et al., 2019). Bakteri *Pseudomonas fluorescens* ini juga dikenal luas sebagai *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yang memiliki kemampuan metabolik yang tinggi, memproduksi enzim dehidrogenase dan oksidase, serta mampu beradaptasi dengan baik dalam kondisi limbah yang memiliki kadar organik tinggi (Kahli et al., 2022).

Pemanfaatan dari bakteri *Pseudomonas fluorescens* dalam proses pengolahan air lindi dapat membantu mempercepat penurunan kadar polutan organik dan logam berat, sekaligus memperbaiki kualitas fisik dari *leachate* yang dihasilkan setelah proses fermentasi (Elita et al., 2020). Untuk dapat mengoptimalkan kinerja dari bakteri tersebut dalam proses fermentasi, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai kinetika pertumbuhan bakteri, yang meliputi laju pertumbuhan spesifik (μ), waktu generasi yang dibutuhkan, dan fase-fase pertumbuhan sel secara keseluruhan (Levenspiel, 1999). Analisis kinetika mikroba memainkan peran penting dalam menentukan kondisi optimum untuk proses fermentasi, seperti volume inokulum yang digunakan, waktu fermentasi yang diperlukan, nilai pH yang ideal, dan suhu yang sesuai agar aktivitas degradasi substrat dapat berlangsung secara maksimal (Madigan et al., 2018).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis mendalam terhadap kinetika pertumbuhan bakteri *Pseudomonas fluorescens* selama proses fermentasi air lindi, serta mengkaji secara detail perubahan karakteristik fisik yang terjadi pada hasil fermentasi sebagai upaya untuk pengembangan metode

biokonversi limbah cair menjadi bahan yang lebih stabil dan ramah lingkungan.

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinetika pertumbuhan dari bakteri hasil fermentasi air lindi. Penelitian ini dilakukan di laboratorium mikrobiologi dan laboratorium air Teknik Lingkungan UPN Veteran Jawa Timur.

Alat yang digunakan dalam proses penelitian ini ialah botol kaca ukuran 1-liter sebanyak 3 buah, kertas saring, oven, furnace, autoclave, Erlenmeyer, tabung reaksi, timbangan analitik, pipet volume, desikatot, alumunium foil, pompa vacuum.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, air lindi, suspensi bakteri *Pseudomonas fluorescens*, aquadest.

Pengambilan Sampel Air Lindi

Pengambilan sampel air lindi dilakukan satu kali. Pengambilan air lindi langsung dilakukan di PDU Jambangan. Pengambilan dilakukan satu kali dengan metode grab sampling sesuai SNI 6989-59:2008. Lindi yang telah diambil menggunakan teknik sampling tersebut, kemudian dimasukkan ke dalam jerigen bervolume ± 5 liter. Lindi diambil dari tempat penampungan lindi hasil pemadatan sampah.

Uji Awal Karakteristik Air Lindi

Uji awal ini dilakukan untuk mengetahui unsur yang terkandung di dalam air lindi. Selain itu, uji ini dimaksudkan untuk melihat kekuatan limbah pada lindi. Pada penelitian ini juga dilakukan uji logam berat air lindi. Serta melakukan pengujian COD secara berkala dengan metode titrimetri. Nilai COD tersebut digunakan untuk menjadi nilai

substrat. Dilakukan juga pengujian pH pada lindi dan akan disesuaikan dengan pH dari bakteri yang akan dicampurkan yaitu 6,5 – 7,5. Jika pH terlalu rendah (<6) tambahkan NaOH atau kapur pertanian (CaCO_3) sedikit demi sedikit sambil diaduk dan diukur kembali. Jika pH terlalu tinggi (>8) tambahkan HCl 1N atau asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) perlahan.

Pretreatment Air Lindi

Pretreatment air lindi dengan metode pemanasan bertujuan untuk mengurangi atau menonaktifkan mikroba liar sehingga proses fermentasi dapat berlangsung optimal oleh mikroba yang diinginkan seperti *Pseudomonas fluorescens*. Proses ini diawali dengan pre-filtrasi menggunakan saringan berukuran 1–2 mm dan dilanjutkan dengan saringan halus 100–200 μm untuk menghilangkan padatan kasar. Selanjutnya, pH air lindi disesuaikan pada kisaran 6,8–7,2 agar sesuai dengan kebutuhan pertumbuhan bakteri target. Air lindi kemudian dipanaskan menggunakan panci tahan panas atau reaktor berpemanas hingga mencapai suhu inti 75–100°C, diaduk secara ringan untuk menjaga distribusi panas merata, dan dipertahankan pada suhu tersebut selama 30 menit. Penghitungan waktu dilakukan setelah suhu inti tercapai. Setelah tahap pemanasan selesai, air lindi segera didinginkan secara cepat hingga suhu 30 ± 2 °C menggunakan metode pendinginan tertutup seperti water bath atau *heat exchanger* sederhana, untuk mencegah pertumbuhan ulang mikroba kontaminan. Proses ini diikuti dengan transfer aseptik ke wadah fermentasi yang telah disterilkan dan pemasangan airlock atau septum, sehingga media siap diinokulasi dengan *P. fluorescens*. Dengan metode ini, diharapkan jumlah mikroba kompetitor berkurang secara

signifikan ($\geq 2-3$ log dari nilai awal), namun kandungan nutrisi dalam air lindi tetap terjaga untuk mendukung fermentasi yang efisien.

Pembuatan Suspensi Cair Bakteri

Prosedur pembuatan suspensi cair *Pseudomonas fluorescens* diawali dengan peremajaan kultur pada media padat Nutrient Agar (NA) yang diinkubasi selama 24 jam pada suhu 30 °C hingga koloni tunggal tumbuh optimal. Selanjutnya, satu hingga dua koloni murni diambil secara aseptik menggunakan ose steril, kemudian diinokulasikan ke dalam media cair Nutrient Broth (NB) sebanyak 50–100 mL dalam erlenmeyer steril. Kultur cair tersebut diinkubasi dengan pengocokan menggunakan shaker pada kecepatan 120–150 rpm selama 24 jam untuk memastikan homogenisasi dan pertumbuhan sel yang merata (Suresh et al., 2022). Setelah inkubasi, suspensi bakteri disesuaikan kerapatannya dengan menambahkan larutan buffer steril (misalnya PBS atau akuades steril) hingga mencapai standar kekeruhan tertentu, misalnya setara dengan McFarland 0,5 (yang setara dengan $1,5 \times 10^8$ CFU/mL). Suspensi cair bakteri yang telah disiapkan kemudian digunakan sebagai inokulum dalam tahap percobaan fermentasi atau pengolahan lanjutan.

Penambahan Konsentrasi Bakteri

Volume bakteri yang ditambahkan pada setiap botol yaitu 5 ml, 7 ml, 10 ml pada tiap botol. Volume air lindi yang digunakan untuk fermentasi sendiri sebanyak 100 ml. Dari hasil fermentasi tersebut yang nantinya akan dilakukan uji karakteristik untuk pupuk organik cair.

Proses Fermentasi

Lakukan fermentasi menggunakan reactor selama 8 hari.

Reaktor yang difermentasi berjumlah 3 buah.

Selama 8 hari proses fermentasi dilakukan pengadukan sebanyak 2 kali pada hari ke-4 dan hari ke-8. Untuk menciptakan kondisi yang optimal bagi pertumbuhan dan aktivitas mikroba. Melalui pengadukan, bakteri dapat tersebar merata dalam media, sehingga setiap bagian substrat dalam lindi dapat terakses secara efektif.

Proses ini juga meningkatkan kontak antara bakteri dan bahan organik, menjaga homogenitas distribusi nutrisi dan pH, serta mencegah terjadinya pengendapan atau penggumpalan bahan di dasar wadah. Selain itu, pada fermentasi aerob, pengadukan berfungsi memaksimalkan transfer oksigen ke dalam larutan, yang sangat dibutuhkan oleh bakteri seperti *Pseudomonas fluorescens* dalam aktivitas metabolismenya. Dengan demikian, pengadukan mendukung kelancaran dan efisiensi proses fermentasi air lindi menjadi produk seperti pupuk organik cair.

Perhitungan Konsentrasi Biomassa

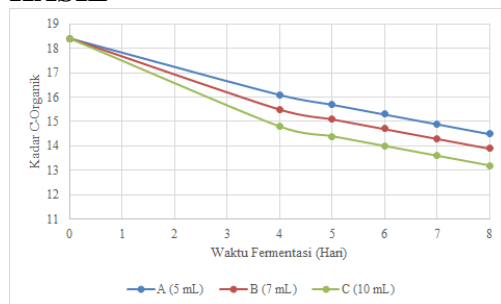
Penentuan konsentrasi biomassa mikroorganisme dalam proses fermentasi dilakukan melalui analisis MLVSS (*Mixed Liquor Volatile Suspended Solids*). Metode ini digunakan untuk memperkirakan jumlah padatan volatil yang berasal dari biomassa aktif dalam campuran cairan fermentasi. Sampel cairan hasil fermentasi diambil sebanyak 10 mL, kemudian disaring menggunakan kertas saring berpori halus (0,45 μ m) yang telah diketahui massa awalnya. Kertas saring beserta padatan yang tertahan dikeringkan di oven pada suhu 105°C selama ± 1 jam, kemudian didinginkan dalam desikator dan ditimbang hingga diperoleh massa padatan tersuspensi total (MLSS). Selanjutnya, kertas saring yang sama

dibakar di dalam tanur pada suhu 550°C selama 15–20 menit untuk menghilangkan komponen volatil, didinginkan kembali dalam desikator, lalu ditimbang untuk memperoleh massa padatan non-volatil (MLSS anorganik) (Sabtanti, 2024).

Uji pH dan Suhu

Parameter nilai pH dan suhu dianalisis pada awal dan akhir perlakuan. Nilai pH diuji dengan menggunakan pH meter, sedangkan pengukuran suhu sampel dilakukan menggunakan termometer. Uji ini dilakukan untuk mengetahui nilai pH dan suhu yang sesuai standart dari pupuk organik cair.

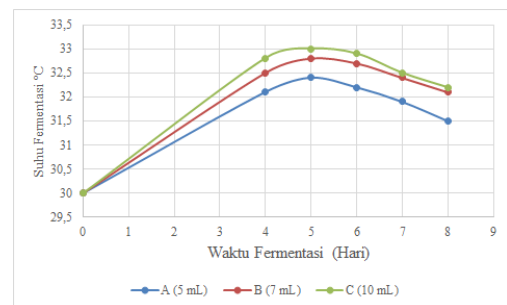
HASIL



Gambar 1. Hubungan Antara Waktu Fermentasi (Hari) dengan Kadar C-Organik (mg/L) pada Berbagai Volume Bakteri (ml)

Grafik menunjukkan bahwa kadar C-organik mengalami penurunan secara bertahap selama proses fermentasi hingga hari ke-8 pada semua perlakuan, yaitu A (5 mL), B (7 mL), dan C (10 mL). Pada awal fermentasi, kadar C-organik relatif sama, namun seiring bertambahnya waktu, terjadi penurunan yang semakin jelas akibat pemanfaatan bahan organik oleh mikroorganisme sebagai sumber energi dan karbon. Penurunan paling signifikan terjadi pada perlakuan C (10 mL), diikuti oleh perlakuan B (7 mL), sedangkan perlakuan A (5 mL) menunjukkan penurunan paling kecil.

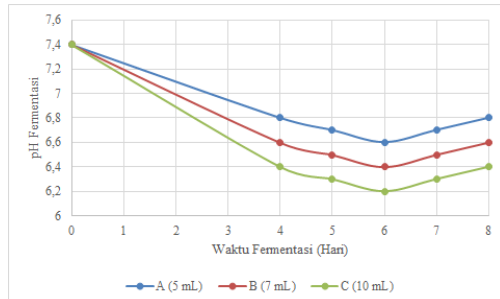
Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar volume inokulum yang digunakan, semakin tinggi aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik, sehingga laju penurunan C-organik menjadi lebih cepat. Dengan demikian, variasi volume inokulum berpengaruh terhadap kinetika fermentasi, khususnya dalam proses degradasi C-organik.



Gambar 2. Hubungan Antara Waktu Fermentasi (Hari) dengan Suhu Fermentasi (°C) pada Berbagai Volume Bakteri (ml)

Grafik menunjukkan bahwa suhu fermentasi pada semua perlakuan, yaitu A (5 mL), B (7 mL), dan C (10 mL), mengalami peningkatan pada fase awal hingga mencapai puncak sekitar hari ke-4 sampai ke-5, kemudian mengalami penurunan hingga hari ke-8. Pada awal fermentasi, suhu berada di sekitar 30°C dan meningkat seiring dengan aktivitas metabolisme mikroorganisme yang semakin intens dalam menguraikan bahan organik. Perlakuan C (10 mL) menunjukkan suhu tertinggi, diikuti oleh B (7 mL), dan A (5 mL) dengan suhu terendah, yang mengindikasikan bahwa semakin besar volume inokulum, semakin tinggi aktivitas mikroba yang menghasilkan panas. Setelah mencapai puncak, suhu mulai menurun karena aktivitas mikroorganisme berkurang akibat berkurangnya substrat yang tersedia.

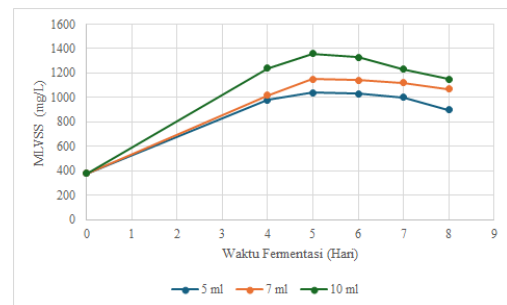
Dengan demikian, pola perubahan suhu ini mencerminkan dinamika pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme selama proses fermentasi.



Gambar 3. Hubungan Antara Waktu Fermentasi (Hari) dengan pH Fermentasi (°C) pada Berbagai Volume Bakteri (ml)

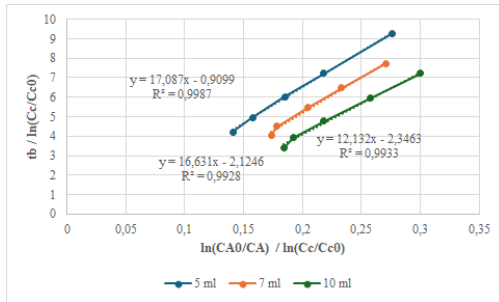
Grafik menunjukkan bahwa nilai pH selama proses fermentasi pada semua perlakuan, yaitu A (5 mL), B (7 mL), dan C (10 mL), mengalami penurunan dari kondisi awal sekitar pH netral (~7,4) hingga mencapai titik terendah pada hari ke-5 hingga ke-6, kemudian sedikit meningkat hingga hari ke-8. Penurunan pH pada fase awal disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme yang menghasilkan asam organik sebagai produk metabolisme selama proses degradasi bahan organik. Perlakuan C (10 mL) menunjukkan penurunan pH paling signifikan, diikuti oleh B (7 mL), dan A (5 mL) dengan penurunan paling kecil, yang mengindikasikan bahwa semakin besar volume inokulum, semakin tinggi aktivitas mikroba dalam menghasilkan asam. Setelah mencapai titik minimum, pH sedikit meningkat yang kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya produksi asam serta mulai terbentuknya senyawa yang bersifat lebih netral atau basa, seperti amonia. Dengan demikian, perubahan pH ini

mencerminkan dinamika aktivitas mikroorganisme selama proses fermentasi.



Gambar 4. Hubungan Antara Waktu Fermentasi (Hari) dengan Konsentrasi Biomassa (mg/L)

Grafik menunjukkan bahwa nilai MLVSS selama proses fermentasi pada semua perlakuan, yaitu 5 mL, 7 mL, dan 10 mL, mengalami peningkatan yang signifikan dari awal hingga sekitar hari ke-4 sampai ke-5, kemudian cenderung menurun hingga hari ke-8. Pada fase awal, peningkatan MLVSS mencerminkan pertumbuhan biomassa mikroorganisme yang aktif memanfaatkan substrat organik untuk berkembang. Perlakuan 10 mL menunjukkan nilai MLVSS tertinggi, diikuti oleh 7 mL dan 5 mL, yang menandakan bahwa semakin besar volume inokulum, semakin tinggi jumlah mikroorganisme yang tumbuh. Setelah mencapai puncak, nilai MLVSS mulai menurun yang mengindikasikan masuknya mikroorganisme ke fase stasioner hingga kematian, akibat berkurangnya ketersediaan nutrisi dan akumulasi produk metabolit. Dengan demikian, pola perubahan MLVSS ini menggambarkan dinamika pertumbuhan mikroorganisme selama proses fermentasi, mulai dari fase eksponensial hingga penurunan aktivitas.



Gambar 5. Grafik Analisis Kinetika Pertumbuhan Bakteri

Grafik menunjukkan hubungan linier antara nilai $\ln(CA_0/CA)$ atau $\ln(C_0/C)$ terhadap waktu fermentasi (t) pada tiga variasi volume inokulum, yaitu 5 mL, 7 mL, dan 10 mL. Ketiga kurva memperlihatkan pola garis lurus dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat tinggi (mendekati 1), yang menandakan bahwa proses degradasi C-organik mengikuti kinetika reaksi orde satu. Nilai kemiringan (slope) dari masing-masing persamaan garis menunjukkan konstanta laju reaksi (k), di mana perlakuan 5 mL memiliki nilai k terbesar, diikuti oleh 7 mL, dan 10 mL sebagai yang terkecil. Hal ini mengindikasikan bahwa laju degradasi relatif lebih cepat pada perlakuan dengan volume inokulum yang lebih kecil dalam konteks model ini. Meskipun demikian, secara keseluruhan semua perlakuan menunjukkan kesesuaian yang baik terhadap model kinetika orde satu, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses fermentasi berlangsung secara konsisten mengikuti mekanisme reaksi tersebut.

Tabel 1. Parameter Fisik (5 ml Bakteri)

Parameter	Hasil
Warna	Coklat pekat
Bau	Bau asam menyengat

Tabel 2. Parameter Fisik (7 ml Bakteri)

Parameter	Hasil
Warna	Coklat pekat
Bau	Bau asam menyengat dan seperti bau tanah

Tabel 3. Parameter Fisik (10 ml Bakteri)

Parameter	Hasil
Warna	Coklat pekat
Bau	Bau asam menyengat seperti telur busuk

PEMBAHASAN

Berdasarkan grafik kadar C-organik mengalami penurunan signifikan dari hari ke-0 hingga hari ke-8 pada semua variasi volume inokulum bakteri. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses fermentasi berlangsung aktif, di mana senyawa karbon organik dimanfaatkan oleh bakteri *Pseudomonas fluorescens* sebagai sumber energi dan karbon untuk pertumbuhan sel. Pada awal fermentasi (hari ke-0 hingga ke-4), penurunan kadar C-organik terjadi cukup cepat karena aktivitas metabolik bakteri berada pada fase eksponensial (log phase). Bakteri memanfaatkan senyawa organik kompleks dalam air lindi seperti asam humat, lignin, dan senyawa fenolik sebagai substrat utama untuk respirasi dan pembentukan biomassa. Selanjutnya, pada hari ke-5 hingga ke-8, laju penurunan C-organik mulai menurun seiring dengan berkurangnya ketersediaan substrat dan meningkatnya produk metabolit yang dapat menghambat aktivitas enzim bakteri. Kondisi ini menandakan bahwa sebagian besar bahan organik mudah terurai telah terdegradasi

menjadi senyawa sederhana seperti CO₂ dan H₂O. Perbedaan kadar C-organik antar variasi (5 mL, 7 mL, dan 10 mL) menunjukkan bahwa semakin besar volume inokulum bakteri, semakin cepat penurunan kadar C-organik terjadi. Hal ini dikarenakan jumlah biomassa yang lebih tinggi mempercepat proses degradasi bahan organik. Dengan demikian, inokulum 10 mL menghasilkan nilai C-organik terendah (13,2 %) pada akhir fermentasi, menandakan efisiensi dekomposisi tertinggi.

Analisis selanjutnya, terlihat bahwa suhu mengalami kenaikan dari hari ke-0 hingga hari ke-5, kemudian menurun kembali hingga hari ke-8 pada semua variasi volume bakteri. Kenaikan suhu pada awal fermentasi disebabkan oleh aktivitas metabolisme mikroorganisme, terutama bakteri *Pseudomonas fluorescens*, yang menguraikan senyawa organik kompleks dalam air lindi menjadi bentuk yang lebih sederhana. Proses ini bersifat eksotermis, sehingga melepaskan panas dan meningkatkan suhu medium. Pada hari ke-5 hingga ke-6, suhu mencapai titik puncak, yang menunjukkan fase logaritmik pertumbuhan bakteri, di mana aktivitas enzimatik dan dekomposisi bahan organik berlangsung maksimal. Setelah fase ini, suhu mulai menurun secara bertahap. Penurunan suhu terjadi karena penurunan aktivitas mikroorganisme, yang disebabkan oleh berkurangnya substrat (nutrien) dan peningkatan produk metabolit yang dapat bersifat toksik terhadap pertumbuhan bakteri (Nurhidayah & Pratiwi, 2021). Selain itu, perbedaan suhu antar variasi (5 mL, 7 mL, dan 10 mL) menunjukkan bahwa semakin besar volume inokulum bakteri, semakin tinggi suhu yang dihasilkan. Hal ini karena jumlah sel mikroba yang lebih banyak mempercepat proses degradasi bahan organik,

sehingga menghasilkan panas lebih besar selama fermentasi.

Nilai pH mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu fermentasi pada seluruh sampel. Pada awal fermentasi (hari ke-0), pH sebesar 7,4 menunjukkan kondisi netral, kemudian menurun hingga kisaran 6,2–6,6 pada hari ke-6 akibat aktivitas metabolisme *Pseudomonas fluorescens*. Selama proses fermentasi terjadi perombakan senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana berupa asam laktat dari aktivitas bakteri asam laktat yang menyebabkan nilai pH menjadi turun (asam/rendah) (Sudaryanti, H., Santoso, A., & Sutanto, A. 2023). Setelah hari ke-6 hingga ke-8, pH sedikit meningkat kembali karena menurunnya aktivitas bakteri dan pemanfaatan kembali asam organik. Penurunan pH lebih cepat terjadi pada volume inokulum yang lebih besar (10 mL) akibat populasi bakteri yang lebih tinggi, yang menyatakan bahwa peningkatan aktivitas mikroorganisme selama fermentasi menurunkan pH melalui pembentukan asam organik. Semakin besar volume inokulum yang ditambahkan, maka jumlah sel bakteri yang berperan dalam proses dekomposisi juga semakin banyak, sehingga produksi asam organik akan meningkat. Hal ini menyebabkan pH media fermentasi cenderung menurun lebih cepat pada sampel dengan volume bakteri lebih tinggi (10 ml) dibandingkan dengan volume lebih kecil (5 ml dan 7 ml).

Pada konsentrasi biomassa menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu fermentasi pada seluruh sampel. Peningkatan ini mengindikasikan adanya pertumbuhan biomassa akibat aktivitas metabolisme mikroorganisme selama proses fermentasi. Sampel dengan volume inokulum terbesar (10 ml) memiliki konsentrasi bakteri

tertinggi pada akhir fermentasi, yaitu sekitar 1.630 mg/L, diikuti oleh sampel 7 ml dan 5 ml. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar volume inokulum yang digunakan, semakin tinggi populasi bakteri yang berkembang karena ketersediaan sel aktif awal yang lebih banyak. Pola kenaikan ini sesuai dengan fase pertumbuhan mikroorganisme pada proses fermentasi, di mana fase eksponensial berlangsung hingga hari ke-8.

Dalam penelitian ini, pengukuran biomassa mikroorganisme dilakukan melalui parameter MLVSS (*Mixed Liquor Volatile Suspended Solids*). Prosedur MLVSS dilakukan dengan cara menyaring sampel fermentasi menggunakan kertas saring berpori 0,45 μm , kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama ± 1 jam untuk menghilangkan kadar air. Setelah itu, residu yang tertinggal dibakar dalam furnace pada suhu 550°C selama 15–20 menit untuk menghilangkan fraksi organik yang mudah menguap. Selisih antara berat sebelum dan sesudah pembakaran digunakan untuk menentukan nilai MLVSS, yang merepresentasikan massa padatan organik (sel mikroba hidup) dalam sampel (Metcalf & Eddy, 2014). Secara konsep, MLVSS dan MLSS (*Mixed Liquor Suspended Solids*) memiliki perbedaan mendasar dalam hal komponen yang diukur. MLSS menggambarkan total padatan tersuspensi dalam campuran lumpur (baik organik maupun anorganik), sedangkan MLVSS hanya mengukur bagian padatan organik yang mudah menguap yang mewakili jumlah biomassa aktif mikroorganisme. Oleh karena itu, nilai MLVSS biasanya lebih rendah dibandingkan MLSS, namun lebih akurat untuk menggambarkan jumlah mikroba yang berperan dalam proses biologis seperti

fermentasi dan penguraian bahan organik (Tchobanoglous et al., 2003; Metcalf & Eddy, 2014).

Analisis paling penting dalam penelitian ini yaitu analisis kinetika. Dari grafik menunjukkan hubungan antara rasio $\ln(CA_0/CA)$ terhadap $\ln(Cc/Cc_0)$ pada tiga variasi penambahan inokulum bakteri *Pseudomonas fluorescens* sebesar 5 mL, 7 mL, dan 10 mL selama proses fermentasi air lindi. Setiap perlakuan menghasilkan garis linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi, yaitu antara 0,9987 untuk 5 ml, 0,9928 untuk 7 ml, dan 0,9933 untuk 10 ml. Nilai R^2 yang mendekati 1 ini menunjukkan bahwa hubungan antara penurunan konsentrasi substrat (C-organik) dengan pertumbuhan biomassa (MLVSS) sangat kuat dan mengikuti pola kinetika reaksi orde pertama. Persamaan umum kinetika orde pertama dinyatakan dengan rumus $\ln(CA / CA_0) = -kt$, di mana CA merupakan konsentrasi substrat pada waktu tertentu, CA_0 merupakan konsentrasi substrat awal, k adalah konstanta laju reaksi, dan t adalah waktu reaksi. Hubungan linear dengan kemiringan negatif (slope negatif) pada grafik tersebut menandakan bahwa konsentrasi substrat menurun secara eksponensial seiring dengan bertambahnya waktu akibat digunakan sebagai sumber energi dan karbon oleh bakteri *Pseudomonas fluorescens* untuk proses metabolisme dan pertumbuhan sel.

Pada perlakuan dengan volume inokulum yang lebih besar, yaitu 5 mL, nilai slope yang diperoleh sebesar 17,087, lebih tinggi dibandingkan dengan 7 mL (16,631) dan 10 mL (12,132). Hal ini mengindikasikan bahwa pada volume 5 ml, aktivitas spesifik bakteri terhadap degradasi substrat lebih optimal. Kondisi tersebut disebabkan oleh rasio inokulum dan substrat yang seimbang,

sehingga tidak terjadi kompetisi atau akumulasi senyawa yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri. Sebaliknya, pada perlakuan 7 ml dan 10 ml, aktivitas degradasi sedikit menurun, kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan substrat dan terjadinya kompetisi nutrisi atau keterbatasan oksigen. Selain itu, peningkatan volume inokulum juga memperpendek fase adaptasi (lag phase) bakteri, sehingga populasi bakteri lebih cepat memasuki fase eksponensial atau fase pertumbuhan logaritmik yang ditandai dengan peningkatan signifikan pada nilai MLVSS. Sebaliknya, pada penambahan inokulum yang lebih sedikit, proses degradasi berlangsung lebih lambat karena jumlah mikroba yang aktif lebih sedikit sehingga pemanfaatan substrat tidak seefisien perlakuan dengan inokulum yang lebih besar.

Ciri khas dari reaksi orde pertama adalah bahwa laju penurunan substrat berbanding lurus dengan konsentrasi substrat pada saat tertentu, dan ketika nilai $\ln(CA_0/CA)$ diplot terhadap waktu, hasilnya berupa garis lurus. Linearitas yang tinggi serta nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan kesesuaian model orde pertama terhadap data percobaan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa proses biodegradasi C-organik pada fermentasi air lindi oleh *Pseudomonas fluorescens* mengikuti kinetika orde pertama, di mana penurunan konsentrasi bahan organik dikontrol oleh jumlah substrat yang tersisa, bukan oleh waktu atau jumlah biomassa semata (Metcalf & Eddy, 2014). Selain itu, laju pertumbuhan mikroorganisme dan penurunan substrat dalam proses fermentasi umumnya mengikuti pola eksponensial yang konsisten dengan model orde pertama. Dengan demikian, grafik tersebut

membuktikan bahwa peningkatan dosis inokulum berpengaruh terhadap percepatan kinetika degradasi C-organik, dan seluruh proses degradasi tersebut mengikuti pola kinetika reaksi orde pertama.

KESIMPULAN

Dengan demikian, fermentasi air lindi oleh *Pseudomonas fluorescens* terbukti efektif dalam menurunkan kandungan bahan organik serta memperbaiki karakteristik fisik air lindi melalui proses biodegradasi yang efisien dan ramah lingkungan.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, disarankan untuk dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi dosis inokulum *Pseudomonas fluorescens* yang lebih luas, misalnya antara 3–15 mL per 100 mL air lindi, guna menentukan konsentrasi optimum yang menghasilkan efisiensi degradasi tertinggi. Selain itu, pengujian pada skala pilot plant dengan sistem aerasi terkontrol dan pengadukan periodik diperlukan agar proses degradasi berlangsung lebih homogen serta dapat diterapkan secara efektif pada unit pengolahan limbah terpadu di TPA atau PDU. Kombinasi *Pseudomonas fluorescens* dengan jenis bakteri lain seperti *Bacillus* sp. atau *Azotobacter* sp. juga berpotensi meningkatkan kualitas hasil fermentasi dan mempercepat proses degradasi bahan organik. Dengan demikian, optimalisasi kondisi fermentasi dan diversifikasi mikroba diharapkan mampu meningkatkan efektivitas biokonversi air lindi menjadi produk yang lebih stabil, ramah lingkungan, dan aplikatif dalam skala industri pengolahan limbah.

DAFTAR RUJUKAN

- Asril, M., Oktaviani, I., & Leksikowati, S. S. (2019). Isolasi Bakteri Indigeneous dari Limbah Cair Tahu dalam Mendegradasi Protein dan Melarutkan Fosfat (Isolation of Indigineous Bacteria from Tofu Wastewater for Degrading Proteins and Solubilizing Phosphate). *Jurnal Teknologi Lingkungan* Vol, 20(1).
- Elita, N., Dharma, S., & Harmailis. (2020). Aplikasi Biofertilizer Mengandung Bakteri Azotobacter dan Pseudomonas fluorescens Indigenou dengan Berbagai Bahan Substitusi terhadap Produksi Padi Metode SRI. *LUMBUNG*, 19(2), 123-130.
- Kahli, H., Alami, M., & Boukraa, F. (2022). Characterization of Pseudomonas fluorescens and Its Role in Plant Growth Promotion. *Journal of Environmental Microbiology*, 14(2), 33–41.
- Kurniawan, S. B., Imron, M. F., & Ismail, N. I. (2021). Leachate Characterization and Treatment: A Review. *Journal of Environmental Management*, 280, 111699.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Limbah Cair Tahu dalam Mendegradasi Protein dan Melarutkan Fosfat. *Teknologi Lingkungan*, 20(1), 67-72.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock Biology of Microorganisms*. Pearson Education.
- Murtafaqoh, V. N. (2022). Kajian Pengolahan Air Lindi dengan Proses Fermentasi Mikroba. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 9(2), 55–63.
- Nurhidayah, A., & Pratiwi, F. (2021). Dinamika aktivitas mikroba dan perubahan suhu pada proses fermentasi bahan organik. *Jurnal Sains dan Aplikasi*, 5(1), 33–41.
- Permono, H., Mustain, A., & Pratiwi, M. K. (2024). Pemanfaatan air lindi untuk pupuk organik cair (POC) dengan bioaktivator EM4 dan Pseudomonas fluorescens pada TPA Supit Urang. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*.
- Probowati, W., Nugraheni, I. A., & Aryani, T. (2021). Efektivitas pupuk cair Pseudomonas fluorescens sebagai agens pengendali hayati terhadap penyakit mosaik tanaman kakao. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 7(1), 42–49.
- Sabtanti, S. (2024). Determination of biomass concentration using MLSS and MLVSS methods [Undergraduate thesis, Universiti Teknologi Petronas]. UTPedia. https://utpedia.utp.edu.my/2938/1/Sabtanti_Thesis_signed.pdf
- Sharma, S., Tiwari, S., & Dixit, A. (2022). Phytoremediation of Leachate: A Sustainable Approach for Wastewater Treatment. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129876.
- Sudaryanti, Santoso, H., & Sutanto, A. (2023). Fermentasi Bekasam Ikan Wader Sebagai Sumber Belajar Bioteknologi Konvensional. *Biolova*, 4(2), 114-120.

Suresh, P., Anbumalarmathi, J., Kannan, M., Kumar, V. S., & Subramanian, K. (2022). Production, optimization, and characterization of antifungal metabolites from *Pseudomonas fluorescens* VSMKU3054 for controlling Fusarium wilt in tomato plants. *Microorganisms*, 10(8),1508.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10081508>