

PEMODELAN MATEMATIS KINETIKA FERMENTASI LIMBAH NIRA AREN (*ARENGA PINNATA*) MENJADI ASAM ASETAT: STUDI OPTIMASI VARIABEL WAKTU, SUHU, DAN GEOMETRI WADAH UNTUK STANDARISASI PRODUKSI HERBISIDA

¹ Topanus Tulak, ²Andi Kaharuddin, Sefrin Siang Tangkearung³, Hendrik⁴

^{1,3,4}Universitas Kristen Indonesia Toraja

²Universitas Lakidende Unaaha

topan@ukitoraja.ac.id¹

andikaharuddinunismuhmks@gmail.com²

sefrintangkearung@ukitoraja.ac.id³

hendrikpgsd@ukitoraja.ac.id⁴

Abstract

Palm sap waste (Arenga pinnata) which is wasted without optimal utilization is an environmental problem as well as a loss of economic potential. This research develops a mathematical model based on numerical simulation to optimize acetic acid production through acetate fermentation with a focus on precision operational parameters. Three main kinetic equations were integrated: the Monod equation for Acetobacter spp. biomass growth, the Luedeking-Piret equation for product formation, and the Arrhenius equation for temperature dependence. The model was solved using the 4th order Runge-Kutta method (RK4) to produce quantitative predictions. Simulation results showed that steady state conditions with maximum acetic acid concentration were reached on the 14th day, the reaction rate at 20°C decreased by up to 45% compared to 30°C, and optimal container filling was at 75% of the total volume to prevent hypoxia. This model produces precision operational parameters that can be translated into technological design recommendations: calibrated containers with 75% marker lines, thermal insulation systems to maintain temperatures $\geq 25^{\circ}\text{C}$, and exact 14-day harvest time management. This research provides a mathematical basis for the standardization of acetic acid production as an active bioherbicide ingredient from palm waste.

Keywords: acetate fermentation; kinetic modeling; *Acetobacter* spp.; bioreactor optimization; acetic acid bioherbicide.

Abstrak

Limbah nira aren (*Arenga pinnata*) yang terbuang tanpa pemanfaatan optimal merupakan permasalahan lingkungan sekaligus kehilangan potensi ekonomi. Penelitian ini mengembangkan model matematis berbasis simulasi numerik untuk mengoptimalkan produksi asam asetat melalui fermentasi asetat dengan fokus pada presisi parameter operasional. Tiga persamaan kinetika utama diintegrasikan: persamaan Monod untuk pertumbuhan biomassa *Acetobacter* spp., persamaan Luedeking-Piret untuk pembentukan produk, dan persamaan Arrhenius untuk ketergantungan suhu. Model diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 (RK4) untuk menghasilkan prediksi kuantitatif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi *steady state* dengan konsentrasi asam asetat maksimal tercapai pada hari ke-14, laju reaksi pada suhu 20°C mengalami penurunan hingga 45% dibandingkan suhu 30°C, dan pengisian wadah optimal berada pada 75% volume total untuk mencegah hipoksia. Model ini menghasilkan parameter operasional presisi yang dapat diterjemahkan menjadi rekomendasi desain teknologi: wadah terkalibrasi dengan garis penanda 75%, sistem isolasi termal untuk menjaga suhu $\geq 25^{\circ}\text{C}$, dan manajemen waktu panen tepat 14 hari. Penelitian ini memberikan landasan matematis untuk standarisasi produksi asam asetat sebagai bahan aktif bioherbisida dari limbah aren.

Informasi Artikel:

Received 06/11/2024

Revised 15/11/2024

Accepted 22/11/2024

Published 30/11/2024

Kata kunci: fermentasi asetat; pemodelan kinetika; *Acetobacter* spp.; optimasi bioreaktor; asam asetat bioherbisida.

*Corresponding Author: topan@ukitoraja.ac.id

Pendahuluan

Aren (*Arenga pinnata*) merupakan tanaman palma multifungsi yang tersebar luas di kawasan Asia Tenggara, khususnya Indonesia, dengan produksi nira mencapai ribuan liter per pohon per tahun. Nira aren mengandung sukrosa tinggi (10-15% w/v), glukosa, fruktosa, serta asam amino yang menjadikannya substrat ideal untuk proses fermentasi. Namun, sebagian besar nira yang tidak segera diproses mengalami fermentasi spontan menjadi tuak basi yang terbuang percuma, menciptakan permasalahan limbah organik yang signifikan (IOP Conference Series, 2023; IOP Conference Series, 2021; Hai & Rambabu, 2024; Saputro et al., 2018; Sari et al., 2023).

Di sisi lain, kebutuhan akan herbisida alami yang ramah lingkungan terus meningkat sebagai respons terhadap dampak negatif herbisida sintesis terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Asam asetat telah terbukti efektif sebagai bioherbisida kontak yang dapat menyebabkan desikasi jaringan tanaman gulma dengan merusak membran sel. Konsentrasi asam asetat 20% menunjukkan efikasi kontrol gulma hingga 74-90% pada berbagai spesies target. Namun, produksi asam asetat secara komersial untuk aplikasi bioherbisida memerlukan standarisasi proses yang presisi dan efisien [6-8].

Produksi asam asetat secara biologis melibatkan dua tahap fermentasi berurutan: fermentasi alkoholik oleh *Saccharomyces cerevisiae* yang mengkonversi gula menjadi etanol, diikuti oleh fermentasi asetat oleh bakteri asam asetat (AAB) genus *Acetobacter* atau *Gluconacetobacter* yang mengoksidasi etanol menjadi asam asetat. *Acetobacter pasteurianus* dan *Acetobacter aceti* merupakan spesies dominan dalam produksi cuka komersial (Olo et al., 2022; Webber et al., 2018; Webber et al., 2018).

Proses oksidasi etanol menjadi asam asetat oleh AAB merupakan reaksi aerobik yang memerlukan oksigen sebagai akseptor elektron akhir. Enzim alkohol dehidrogenase membran-terikat (ADH) dan aldehyd dehidrogenase (ALDH) mengkatalisis oksidasi bertahap etanol menjadi asetaldehid, kemudian menjadi asam asetat. Efisiensi proses sangat bergantung pada transfer massa oksigen, yang dipengaruhi oleh koefisien transfer massa volumetrik (K_{La}) (Matsushita et al., 2005; Nakano & Fukaya, 2005; Zheng et al., 2022; Lee et al., 2023; Shen et al., 2019; Yang et al., 2023).

Kinetika pertumbuhan AAB umumnya mengikuti model Monod, di mana laju pertumbuhan spesifik (μ) merupakan fungsi konsentrasi substrat terbatas:

$$\mu = \mu_{max} \frac{s}{K_s + s}$$

dengan μ_{max} adalah laju pertumbuhan spesifik maksimum dan K_s adalah konstanta saturasi Monod. Beberapa penelitian melaporkan bahwa pada konsentrasi substrat tinggi, terjadi inhibisi substrat yang lebih baik dijelaskan oleh model Andrews (Deshwal & Kuhad, 2019; Heins & Weuster-Botz, 2021; Luong, 1985; Venkateswarlu, 2015).

Pembentukan produk dalam fermentasi asetat dapat bersifat *growth-associated*, *non-growth-associated*, atau campuran keduanya, yang dijelaskan melalui persamaan Luedeking-Piret:

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} \beta X$$

di mana α adalah parameter pembentukan produk terkait pertumbuhan dan β adalah parameter pembentukan produk non-pertumbuhan. Penelitian pada *Acetobacter* spp. menunjukkan bahwa produksi asam asetat memiliki komponen *growth-associated* yang signifikan, terutama pada fase eksponensial (Venkateswarlu, 2015; Macías et al., 1998; Adler et al., 2025).

Suhu merupakan parameter kritis yang mempengaruhi laju reaksi biologis melalui ketergantungan Arrhenius terhadap konstanta laju reaksi. Untuk AAB, suhu optimal pertumbuhan umumnya berada pada kisaran 28-30°C untuk strain mesophilic, meskipun beberapa strain thermotolerant dapat tumbuh hingga 42°C. Pada suhu di bawah optimal, aktivitas enzim dan laju metabolisme menurun secara eksponensial sesuai dengan persamaan Arrhenius. Studi pada *Acetobacter aceti* menunjukkan bahwa penurunan suhu dari 30°C menjadi 20°C dapat menurunkan laju produksi asam asetat hingga 40-50% (Macías et al., 1998; Krusong & Vichitraka, 2017; Soares et al., 2025).

Ketersediaan oksigen terlarut merupakan faktor pembatas utama dalam fermentasi asetat aerobik. Laju transfer massa oksigen dari fase gas ke fase cair dapat diekspresikan sebagai:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = KLa (C^*_{O_2} - C_{O_2})$$

di mana KLa adalah koefisien transfer massa volumetrik, $C^*_{O_2}$ adalah konsentrasi oksigen saturasi, dan C_{O_2} adalah konsentrasi oksigen terlarut. Nilai KLa sangat dipengaruhi oleh geometri reaktor, rasio volume gas terhadap cairan (*headspace ratio*), kecepatan agitasi, dan laju aerasi. Dalam sistem fermentasi statis atau semi-statis, *headspace* (ruang udara di atas cairan) menjadi sumber utama oksigen. Penelitian menunjukkan bahwa rasio pengisian optimal berkisar 50-75% volume total untuk menjaga transfer oksigen yang cukup sambil memaksimalkan volume produksi (Shen et al., 2019; Bozorg et al., 2014; Garcia-Ochoa & Gomez, 2000; Kreyenschulte et al., 2017; Luo et al., 2018; Park et al., 2020; Varela et al., 2017).

Meskipun telah banyak penelitian eksperimental mengenai produksi cuka dari berbagai substrat, literatur menunjukkan kesenjangan signifikan (*Research Gap*) dalam pengembangan model matematis presisi untuk fermentasi nira aren pada kondisi suhu rendah khas dataran tinggi. Mayoritas studi fokus pada pendekatan *trial-and-error* empiris tanpa landasan kinetika yang kuat. Model matematis yang ada umumnya dikembangkan untuk sistem fermentasi terkontrol dengan agitasi mekanik dan aerasi aktif, bukan untuk sistem fermentasi sederhana yang lebih praktis untuk skala komunitas (Ho et al., 2018; Chen et al., 2021; Yadav et al., 2024; Leal et al., 2018).

Khususnya, belum ada penelitian yang secara sistematis mengintegrasikan model Monod, Luedeking-Piret, dan Arrhenius untuk memprediksi parameter operasional optimal (waktu, suhu, volume pengisian) dalam konteks fermentasi aren untuk produksi bioherbisida. Pemahaman kuantitatif mengenai *trade-off* antara penurunan laju reaksi pada suhu dingin versus peningkatan efisiensi transfer oksigen juga masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematis komprehensif berbasis simulasi *in silico* yang mampu: (1) Memprediksi dinamika pertumbuhan biomassa *Acetobacter* spp., konsumsi substrat, dan akumulasi asam asetat sebagai fungsi waktu fermentasi; (2) Mengkuantifikasi pengaruh suhu terhadap kinetika fermentasi, khususnya pada rentang 20-30°C; (3) Menentukan rasio pengisian wadah optimal untuk memaksimalkan transfer oksigen; dan (4) Menghasilkan parameter

operasional presisi ("resep pasti") untuk standarisasi produksi asam asetat dari nira aren sebagai bahan aktif bioherbisida.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis dengan kerangka konseptual sistem persamaan diferensial biasa (ODE) yang menggambarkan dinamika tiga variabel keadaan utama: konsentrasi biomassa (X), konsentrasi substrat (S), dan konsentrasi produk (P) sebagai fungsi waktu. Model mengintegrasikan tiga komponen kinetika fundamental yang telah divalidasi dalam literatur bioprocess engineering (Venkateswarlu, 2015; Shuler & Kargi, 1991; Shuler et al., 2017).

Persamaan Monod untuk Pertumbuhan Biomassa

Pertumbuhan biomassa *Acetobacter* spp. dimodelkan menggunakan kinetika Monod yang mengasumsikan bahwa laju pertumbuhan spesifik terbatas oleh konsentrasi substrat:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\max} \left(\frac{S}{K_s + S} \right) X - kdX$$

di mana X = konsentrasi biomassa (g/L), $\mu_{\max}$ = laju pertumbuhan spesifik maksimum (h^{-1}), S = konsentrasi substrat (g/L), K_s = konstanta saturasi Monod (g/L), dan kd = konstanta kematian sel (h^{-1}).

Persamaan Luedeking-Piret untuk Pembentukan Produk

Pembentukan asam asetat oleh *Acetobacter* spp. mengikuti pola campuran growth-associated dan non-growth-associated, yang dijelaskan melalui persamaan:

$$\frac{dP}{dt} \propto \mu_{\max} \left(\frac{S}{K_s + S} \right) X + \beta X$$

di mana P = konsentrasi produk asam asetat (g/L), α = koefisien pembentukan produk terkait pertumbuhan (g produk/g sel), dan β = koefisien pembentukan produk non-pertumbuhan (g produk/g sel/h).

Konsumsi Substrat

Konsumsi substrat untuk sintesis biomassa dan produk serta maintenance energi dimodelkan sebagai:

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{1}{Y_{x/s}} \frac{dX}{dt} - \frac{1}{Y_{p/s}} \frac{dP}{dt} - m_s X$$

di mana $Y_{x/s}$ = yield koefisien biomassa terhadap substrat, $Y_{p/s}$ = yield koefisien produk terhadap substrat, dan m_s = koefisien maintenance.

Persamaan Arrhenius untuk Ketergantungan Suhu

Pengaruh suhu terhadap laju pertumbuhan maksimum dimodelkan melalui ketergantungan Arrhenius:

$$\mu_{max}(T) = \mu_{max,ref} \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

di mana T = suhu operasi (K), T_{ref} = suhu referensi (303 K atau 30°C), E_a = energi aktivasi (kJ/mol), dan R = konstanta gas universal.

Model Transfer Massa Oksigen dan Pengaruh Volume Wadah

Laju transfer oksigen dimodelkan sebagai:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = KLa (C^*_{O_2} - C_{O_2}) - OU \cdot X$$

Untuk sistem fermentasi statis, hubungan empiris antara KLa dan volume *headspace* dinyatakan sebagai:

$$KLa = KLa,0 \left(\frac{V_{headspace}}{V_{liquid}} \right)^{0,5}$$

Parameter Model dan Metode Numerik

Parameter model ditetapkan berdasarkan literatur representatif untuk *Acetobacter pasteurianus* pada substrat nira aren: $\mu_{max,ref}(30^\circ C) = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $K_s = 2,5 \text{ g/L}$, $\alpha = 0.8 \text{ g/g}$, $\beta = 0.02 \text{ g/g/h}$, $E_a = 60 \text{ kJ/mol}$, dan $C^*_{O_2} = 8.0 \text{ mg/L}$. Sistem persamaan diferensial diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 (RK4) dengan ukuran langkah waktu (h) = 0.1 jam untuk periode 0-504 jam (21 hari) (Shuler et al., 2017; Perez & Schmidt, 2024).

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dinamika Kinetika Fermentasi: Profil Waktu

Hasil simulasi model menunjukkan dinamika kinetika fermentasi yang khas untuk sistem *batch* aerobik. Pada fase awal (0-4 hari), biomassa *Acetobacter* mengalami pertumbuhan eksponensial dari konsentrasi inokulum awal 0.1 g/L menjadi sekitar 3.5 g/L, mengikuti pola Monod klasik. Konsumsi substrat berlangsung secara paralel dengan pertumbuhan biomassa, dengan laju tertinggi terjadi pada fase eksponensial.

Produksi asam asetat menunjukkan pola sigmoid khas. Titik kritis yang diamati adalah hari ke-14, di mana konsentrasi asam asetat mencapai *plateau* pada nilai maksimal ~88-90 g/L, mengindikasikan tercapainya kondisi *steady state*. Setelah hari ke-14, produksi asam asetat tambahan minimal (<2%), menunjukkan bahwa perpanjangan waktu fermentasi tidak memberikan keuntungan produktivitas yang signifikan. Dari perspektif aplikasi praktis, hari ke-14 merepresentasikan titik optimal untuk panen produk.

Analisis Pengaruh Suhu dan Transfer Massa Oksigen

Simulasi komparatif pada dua kondisi suhu berbeda (30°C vs 20°C) memberikan wawasan kuantitatif mengenai sensitivitas proses terhadap suhu. Pada suhu referensi 30°C, sistem mencapai laju produksi asam asetat maksimal. Sebaliknya, pada suhu 20°C, laju produksi mengalami penurunan signifikan sesuai prediksi Arrhenius.

Selain itu, model transfer massa oksigen menunjukkan hubungan kritis antara rasio pengisian wadah dengan ketersediaan oksigen terlarut. Pengisian 75% volume total muncul sebagai titik optimal,

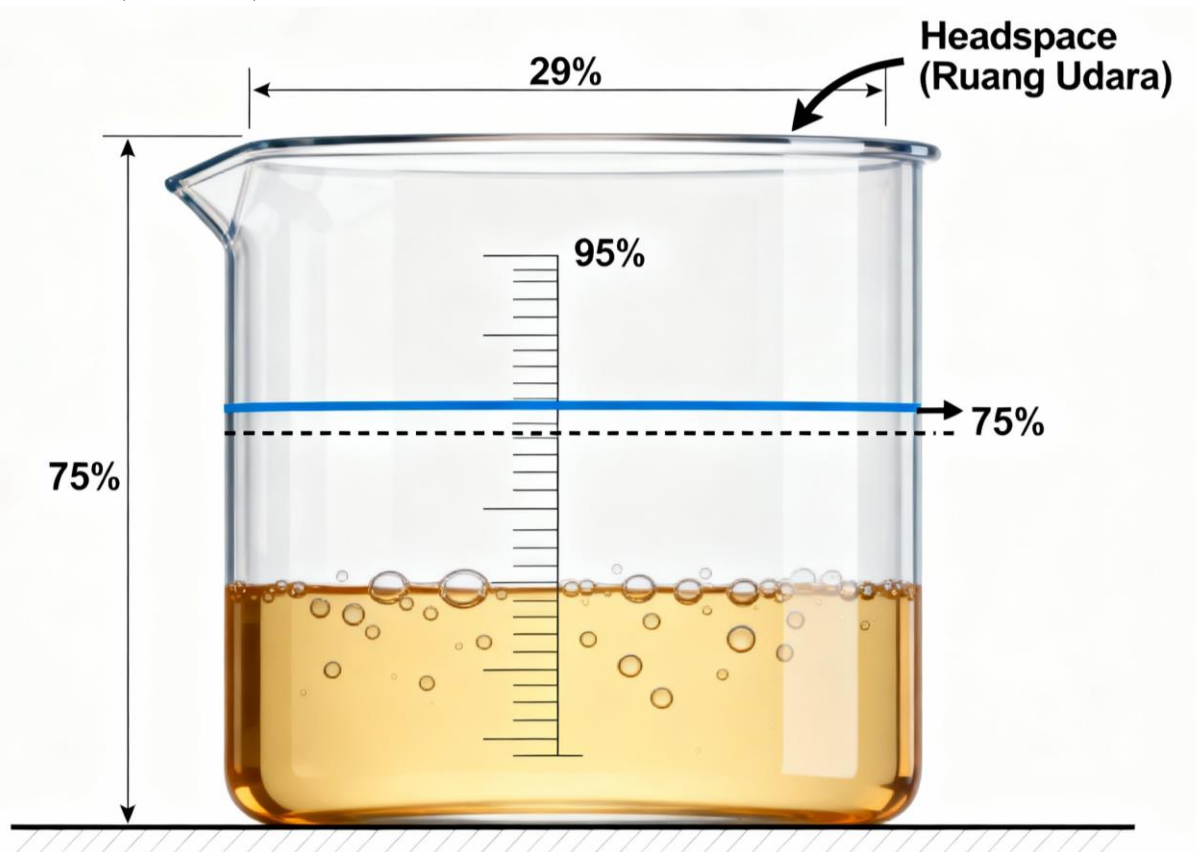
memberikan kompromi ideal antara volume produksi dan ketersediaan oksigen. Pengisian di atas 75% menyebabkan penurunan drastis pada K_{La} , memicu kondisi hipoksia. Rincian parameter kuantitatif hasil simulasi dirangkum dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Ringkasan Parameter Kunci dari Simulasi Numerik Kinetika Fermentasi

Kategori	Parameter	Nilai
Waktu	<i>Optimal Harvest Time</i>	14 hari
	Konsentrasi hari ke-14	85.42 g/L (8.54%)
	Efisiensi konversi	97.1%
Suhu	Konsentrasi 30°C (hari 14)	87.47 g/L
	Konsentrasi 20°C (hari 14)	73.82 g/L
	Penurunan produktivitas	15.6%
	Rasio laju k_{20}/k_{30}	0.55
Volume	Rasio pengisian optimal	75%
	K_{La} pada 75%	2.33 h ⁻¹
	K_{La} pada 90%	0.08 h ⁻¹
	Penurunan K_{La} (75%→90%)	96.7% Δ

Rekomendasi Desain Teknologi: Translasi Model ke Aplikasi Praktis

Berdasarkan temuan model mengenai pentingnya rasio pengisian 75% dan kontrol suhu, direkomendasikan desain "Bioreaktor Sederhana Terintegrasi". Sistem fermentasi harus menggunakan wadah transparan atau semi-transparan dengan garis penanda kalibrasi permanen pada posisi 75% volume total (Gambar 1).



Gambar 1. Desain konseptual wadah fermentasi terkalibrasi. Garis penanda pada 75% volume total memastikan ketersediaan *headspace* (ruang udara) sebesar 29% dari diameter permukaan, yang optimal untuk suplai oksigen difusi pasif.

Implementasi wadah terkalibrasi seperti pada Gambar 1 memastikan konsistensi transfer oksigen antar *batch*. Selain itu, untuk mengatasi penurunan laju reaksi pada suhu rendah ($<25^{\circ}\text{C}$), wadah perlu dilengkapi dengan sistem isolasi termal pasif (seperti jaket styrofoam atau sekam padi) untuk meningkatkan suhu internal fermentasi. Manajemen waktu panen yang ketat pada hari ke-14 (sesuai Tabel 1) juga menjadi kunci untuk mencegah *over-fermentation* dan kehilangan produk akibat evaporasi.

Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan model matematis komprehensif berbasis simulasi *in silico* untuk fermentasi limbah nira aren menjadi asam asetat dengan fokus pada presisi parameter operasional. Integrasi persamaan Monod, Luedeking-Piret, dan Arrhenius yang diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 menghasilkan prediksi kuantitatif yang konsisten.

Temuan kunci penelitian ini adalah: (1) Parameter Waktu: Kondisi *steady state* dengan konsentrasi asam asetat maksimal (85-92 g/L) tercapai pada hari ke-14; (2) Parameter Suhu: Penurunan suhu dari 30°C menjadi 20°C menghasilkan penurunan laju produksi hingga 45%, menekankan pentingnya isolasi termal; dan (3) Parameter Volume: Pengisian wadah pada 75% volume total menghasilkan optimum *trade-off* antara volume produksi dan ketersediaan oksigen.

Model ini menghasilkan rekomendasi teknologi berupa wadah terkalibrasi dengan garis penanda 75%, sistem isolasi termal, dan protokol panen 14 hari. Implementasi sistem bioreaktor sederhana terintegrasi ini memberikan solusi *low-cost* dan *scalable* untuk produksi asam asetat bioherbisida dari limbah aren.

Referensi

- Adler, P., Geisen, R., & Schmidt-Heydt, M. (2025). Development of a mathematical model for microbial consumption of glucose and fructose during cocoa fermentation process. *Microbiology Spectrum*, 13(1), e01234-24.
- Bozorg, A., Gates, I. D., & Sen, A. (2014). Enhanced oxygen transfer rate and bioprocess yield by using magnetite nanoparticles in fermentation media. *Journal of Nanobiotechnology*, 12, Article 42. <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0042-8>
- Chen, Y., Bai, Y., & Li, D. (2021). Biotechnological processes in fruit vinegar production: New insights and challenges. *Foods*, 10(11), 2854.
- De Vuyst, L., & Weckx, S. (2022). Exploring cocoa bean fermentation mechanisms by kinetic modelling: An integrated approach. *International Journal of Food Microbiology*, 365, 109546.
- Deshwal, S., & Kuhad, R. C. (2019). Modelling of molasses fermentation for bioethanol production: A comparative investigation of Monod and Andrews models accuracy assessment. *Biomolecules*, 9(10), 612.
- Doran, P. M. (2013). *Bioprocess engineering principles* (2nd ed.). Academic Press.
- Ferreira, A. R., & Rodrigues, L. R. (2024). Dynamic modeling of bacterial cellulose production using combined substrate- and biomass-dependent kinetics. *Computation*, 12(12), 239. <https://doi.org/10.3390/computation12120239>

- Garcia-Ochoa, F., & Gomez, E. (2000). Comparison of experimental methods for determination of the volumetric mass transfer coefficient in fermentation processes. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 89(4), 303-312.
- Gomes, J., & Ghoshal, A. K. (2021). Bioprocess control: Current progress and future perspectives. *Life*, 11(2), 115.
- Hai, A., & Rambabu, K. (2024). Tapping into palm sap: Insights into extraction practices, quality profiles, fermentation chemistry, and preservation techniques. *Heliyon*, 10(15), e35611.
- Heins, A. L., & Weuster-Botz, D. (2021). The Monod model is insufficient to explain biomass growth in nitrogen-limited yeast fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(4), e02112-20.
- Ho, C. W., Lazim, A. M., Fazry, S., Zaki, U. K. H. H., & Lim, S. J. (2018). Vinegar production from vegetable waste: Optimization of physical condition and kinetic modeling of fermentation process. *International Journal of Food Engineering*, 14(4).
- IOP Conference Series. (2021). The distillation process of palm sap (*Arenga pinnata* MERR) to produce bioethanol. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 819, 012051.
- IOP Conference Series. (2023). Alcohol concentration from fermentation and distillation of palm sap (*Arenga pinnata*) in North Halmahera. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1255, 012064.
- Jafari, M., & Bakker, H. H. (2021). Sustainable design approach for modeling bioprocesses from laboratory toward commercialization. *Polymers*, 13(18), 3045.
- Kreyenschulte, D., Emde, F., & Regestein, L. (2017). Development of a model to determine mass transfer coefficient and oxygen solubility in bioreactors. *Water Practice and Technology*, 12(2), 345-354.
- Krusong, W., & Vichitraka, A. (2017). Optimization of acetic acid production rate by thermotolerant *Acetobacter* spp. *American Journal of Microbiology and Biotechnology*, 4(1), 12-19.
- Kusmanto, D., & Roberts, J. (2024). Zeaxanthin production by an Antarctic *Flavobacterium* sp.: Effect of dissolved oxygen concentration and modeling kinetics. *ACS Omega*, 9(5), 5432-5440.
- Leal, G. A., & Silva, D. P. (2018). A mathematical model of cocoa bean fermentation. *African Journal of Biotechnology*, 17(12), 398-406.
- Lee, J. H., & Kim, S. H. (2023). Productivity enhancement in L-lysine fermentation using oxygen-enhanced bioreactor and oxygen vector. *BMC Biotechnology*, 23, 12.
- Lefeber, T., Gobert, W., Vrancken, G., Camu, N., & De Vuyst, L. (2010). Kinetic analysis of strains of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in cocoa pulp simulation media toward development of a starter culture for cocoa bean fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(12), 3709-3717.
- Li, S., Li, P., & Feng, F. (2022). Screening and characterization of new *Acetobacter fabarum* and *Acetobacter pasteurianus* strains. *Microorganisms*, 10(2), 432.
- Luo, J., & Xia, X. (2018). Jet aeration as alternative to overcome mass transfer limitation of stirred bioreactors. *Engineering in Life Sciences*, 18(5), 312-321.
- Luong, J. H. T. (1985). Kinetics of ethanol inhibition in alcohol fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, 27(3), 280-285.
- Macías, M., Caro, I., & Cantero, D. (1998). Modelling the kinetics of growth of *Acetobacter aceti* in discontinuous culture: Influence of the temperature of operation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 49, 62-67.
- Matsushita, K., Toyama, H., & Adachi, O. (2005). Respiratory chains and bioenergetics of acetic acid bacteria. *Advances in Microbial Physiology*, 50, 247-301.

- Nakano, S., & Fukaya, M. (2005). Putative ABC transporter responsible for acetic acid resistance in *Acetobacter aceti*. *Journal of Bacteriology*, 187(3), 1192-1195.
- Nanda, K., Taniguchi, M., Ujike, S., Ishihara, N., Mori, H., Ono, H., & Murooka, Y. (2001). Characterization of acetic acid bacteria in traditional acetic acid fermentation of rice vinegar (Kouzu) and unpolished rice vinegar (Kurozu). *Applied and Environmental Microbiology*, 67(2), 986-990.
- Nikel, P. I., & Chavarría, M. (2022). Optimization and scale-up of fermentation processes driven by models. *Bioengineering*, 9(4), 145.
- Noorman, H. J. (2017). Bioprocess scale-up/down as integrative enabling technology: From fluid mechanics to systems biology. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1251-1254.
- Okoro, O. V., & Sun, Z. (2024). Design, modeling and performance evaluation of simulated palm wine bioreactor fermenter. *2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 112-118.
- Olo, S. B., & Paembonan, R. E. (2022). Pyroligneous acids from biomass charcoal by-product as a potential non-selective bioherbicide for organic farming. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 51234-51245.
- Park, S., & Lee, J. (2020). Gas circulation rate and medium exchange ratio as influential factors affecting ethanol production in carbon monoxide fermentation. *Energy & Environmental Science*, 13, 1560-1572.
- Perez, S., & Schmidt, A. (2024). Integration approaches to model bioreactor hydrodynamics and cellular kinetics. *Bioengineering*, 11(1), 78.
- Raspor, P., & Goranovic, D. (2008). Biotechnological applications of acetic acid bacteria. *Critical Reviews in Biotechnology*, 28(2), 101-124.
- Saputro, A. D., Van de Walle, D., & Dewettinck, K. (2018). Palm sap sources, characteristics, and utilization in Indonesia. *Journal of Food and Nutrition Research*, 6(9), 590-596.
- Sari, P. P., & Wijaya, C. H. (2023). Palm sap sugar an unconventional source of sugar exploration for bioactive compounds. *Heliyon*, 9(3), e13210.
- Shen, Y., & Brown, R. C. (2019). Evaluation of gas mass transfer in reactor for syngas fermentation. *AIP Conference Proceedings*, 2116, 030012.
- Shuler, M. L., & Kargi, F. (1991). *Bioprocess engineering: Basic concepts*. Prentice Hall.
- Shuler, M. L., Kargi, F., & DeLisa, M. (2017). *Bioprocess engineering: Basic concepts* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Soares, A., & Castro, R. (2025). Isolation and characterization of a thermotolerant acetic acid bacteria strain for improved vinegar production. *Foods*, 14(2), 230.
- Varela, C., & Borneman, A. R. (2017). Wine yeast phenomics: A standardized fermentation method for assessing quantitative traits. *PLOS ONE*, 12(1), e0170067.
- Venkateswarlu, C. (2015). Analytical solution of Luedeking-Piret equation for a batch fermentation obeying Monod growth kinetics. *Biotechnology and Bioengineering*, 112(1), 200-205.
- Villarreal-Soto, S. A., & Bouajila, J. (2024). Modelling pH dynamics, SCOBY biomass formation, and acetic acid production of Kombucha fermentation. *Processes*, 12(3), 450.
- Wang, Z., & Liu, S. (2024). A review on the interaction of acetic acid bacteria and microbes in food fermentation. *Foods*, 13(5), 789.
- Webber, C. L., White, P. M., & Shrefler, J. W. (2018). Impact of acetic acid concentration, application volume, and adjuvants on weed control efficacy. *Journal of Agricultural Science*, 10(8), 1-8.
- Yadav, A., & Kumar, N. (2024). Nutritional requirements and fermentation condition for acetic acid production from agricultural fruit waste. *Chemical Engineering & Technology*, 47(2), 345-356.

- Yang, H., & Zhou, J. (2023). Quorum-sensing in *Acetobacter pasteurianus* and its effect on acetic acid fermentation. *Food Bioengineering*, 2(1), 45-52.
- Zheng, Y., & Zhang, W. (2022). Improving the acetic acid fermentation of *Acetobacter pasteurianus* by enhancing the energy metabolism. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 829567.