

Dampak Aplikasi Vinase terhadap Lingkungan dan Pertumbuhan Tanaman Tebu (*Saccharum officinarum* L.)

Rivandi Pranandita Putra^{1✉}, Vita Ayu Kusuma Dewi², Muhammad Rasyid Ridla Ranomahera³, Nindya Arini⁴, Amnan Haris⁵

^{1,3} Sub Bagian Penelitian Pra Panen, Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI), Indonesia

² Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Indonesia

⁴ Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Muria Kudus, Indonesia

⁵ Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 24-05-2024

Direvisi : 01-06-2024

Diterima : 04-06-2024

Kata Kunci:

Lingkungan, Pengolahan,
Tebu, Vinase

Keywords:

Environment, Processing,
Sugarcane, Vinasse

ABSTRAK

Vinase merupakan limbah cair dari industri bioetanol. Vinase diketahui dapat menimbulkan pencemaran lingkungan sekaligus berpotensi dijadikan sebagai material pemupukan dan irigasi, terutama di perkebunan tebu. Penelitian ini merupakan studi literatur yang bertujuan untuk membahas mengenai dampak aplikasi vinase terhadap lingkungan dan pertumbuhan tebu. Hasil studi menunjukkan bahwa vinase dapat digunakan sebagai pupuk karena mengandung berbagai unsur hara terutama kalium (K), bahkan dosis tertentu vinase dapat mensubstitusi pupuk anorganik pada budidaya tebu. Beberapa studi menunjukkan korelasi positif antara vinase dengan pertumbuhan dan hasil tebu. Namun, aplikasi vinase dalam bentuk vinase mentah (VM) dapat berdampak negatif jika dilakukan dalam jangka panjang, antara lain degradasi tanah, pencemaran badan air, hingga kematian tebu. Berbagai dampak negatif VM ini dapat diminimalkan melalui pengaturan jumlah dan konsentrasi VM atau pengolahan VM tersebut, baik secara anaerobik, aerobik, maupun biologis. Pengolahan VM dapat mengurangi BOD, COD, serta substansi kimia yang berbahaya sehingga tidak menimbulkan pencemaran lingkungan yang serius.

ABSTRACT

Vinasse is a by-product from the bioethanol industry. Vinasse is known to cause environmental pollution and has the potential to be used as a fertilizer and irrigation material, especially in sugar cane plantations. This research is a literature study that aims to discuss the impact of vinasse application on the environment and sugarcane growth. Results reveal that vinasse can be used as fertilizer as it contains various nutrients, particularly potassium (K), and even certain doses of vinasse can substitute for inorganic fertilizer in sugarcane cultivation. Several studies found a positive correlation between vinasse and sugarcane growth and yield. However, the application of vinasse in the form of raw vinasse (VM) may have adverse impacts if carried out in the long term, including soil degradation, water bodies pollution, and the death of sugar cane. These negative impacts of VM can be minimized by regulating the number and concentration of VM or processing the VM, either anaerobically, aerobically, or biologically. VM processing can reduce BOD, COD, and dangerous chemical substances so that it does not cause serious environmental pollution.

Corresponding Author:

Rivandi Pranandita Putra

Sub Bagian Penelitian Pra Panen, Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI), Indonesia

Jl. Pahlawan No. 25, Kota Pasuruan, Jawa Timur, Indonesia 671262

Email: rivandiprananditap@gmail.com

PENDAHULUAN

Produksi bioetanol menghasilkan residu berupa vinase yang berwujud cair (Gurgel *et al.*, 2015; Bonomi *et al.*, 2016). Dari satu liter produksi etanol, dihasilkan sekitar delapan hingga 15 liter vinase (Bonomi *et al.*, 2016; Leme & Seabra, 2017). Vinase merupakan masalah bagi industri bioetanol karena besarnya volume yang dihasilkan dan berkontribusi terhadap polusi lingkungan. Pada industri bioetanol berbahan dasar tebu, vinase dihasilkan dari molases, sari tebu (*juice*), atau campuran keduanya (*mixed must*) (Prado *et al.*, 2013; Gurgel *et al.*, 2015).

Sampai saat ini, perdebatan mengenai pemanfaatan vinase masih muncul di kalangan ilmuwan. Hal ini karena vinase dapat mencemari lingkungan, namun di sisi lain juga berpotensi dimanfaatkan sebagai material pupuk dan irigasi. Vinase dapat digunakan untuk fertigasi tanaman pertanian karena mengandung bahan organik (BO) dan berbagai unsur hara yang dibutuhkan tanaman (España-Gamboa *et al.*, 2017; Pandey *et al.*, 2018).

Mulyanto (2018) menyebutkan bahwa ada dua pemanfaatan utama vinase, yakni sebagai sumber energi (biogas) dan pupuk organik cair (POC). Dalam praktiknya, vinase acap kali dibuang langsung ke sungai oleh pabrik bioetanol maupun pabrik gula (PG) yang menyebabkan masalah lingkungan serius (Gurgel *et al.*, 2015). Fertigasi (pemupukan sekaligus irigasi) vinase mentah (VM) merupakan praktik yang sering dilakukan untuk memanfaatkan ulang dan membuang vinase (Christofolletti *et al.*, 2013). VM merujuk pada vinase yang belum terolah.

Dalam kuantitas yang besar, aplikasi VM dapat mengakibatkan berbagai masalah lingkungan, antara lain kejenuhan tanah oleh BO serta kontaminasi badan air (España-Gamboa *et al.*, 2017) karena kandungan kimianya. Hingga saat ini, tidak sedikit pabrik bioetanol yang langsung memanfaatkan VM sebagai bahan fertigasi ke lahan pertanian seperti perkebunan tebu, tanpa terlebih dahulu memproses limbah tersebut. Padahal, fertigasi dengan VM seringkali menjadi jalan pemecahan masalah yang kurang tepat (Rodrigues Reis & Hu, 2017).

Hasil penelitian yang kontradiktif dalam literatur menyebabkan kebingungan mengenai pemanfaatan vinase yang baik di kalangan praktisi dan juga akademisi. Oleh karena itu, dibutuhkan studi literatur yang membahas lebih dalam mengenai dampak aplikasi vinase terhadap lingkungan dan juga pertumbuhan tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari mengenai dampak positif maupun negatif aplikasi VM terhadap lingkungan dan pertumbuhan tanaman tebu (*Saccharum officinarum* L.). Tanaman tebu dipilih karena vinase sering diaplikasikan pada tanaman tersebut (Naspolini *et al.*, 2017). Beberapa saran juga diberikan dalam penelitian ini sebagai *win-win solution* untuk memanfaatkan vinase tanpa menimbulkan pencemaran lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif yang menggunakan metode kepustakaan atau *literature review*. Literatur yang digunakan berupa artikel jurnal ilmiah, buku, dan situs *online* yang berkaitan dengan topik yang diulas dalam artikel ini, yakni karakteristik vinase, dampak vinase terhadap lingkungan dan pertumbuhan tanaman tebu, serta beberapa alternatif pengolahan vinase. Beberapa *database* digunakan untuk pencarian literatur dalam penelitian ini, antara lain Web of Science, Scopus, SINTA, Garuda, dan Google Scholar.

Seluruh literatur selanjutnya dikumpulkan dan selanjutnya dibaca satu per satu dengan metode *scanning* dan *skimming*. Literatur dibaca secara detail ketika ada sumber informasi atau data yang kemudian dibahas secara mendalam dalam artikel ini. Data dalam literatur-literatur tersebut juga diperiksa, diteliti, dan dikelompokkan menjadi positif, negatif, dan netral. Kelompok positif menandakan pengaruh positif vinase terhadap lingkungan dan/atau pertumbuhan tebu, dan demikian pula untuk negatif dan netral. Selanjutnya, dilakukan penyusunan narasi yang kemudian dikembangkan menjadi artikel. Melalui metode yang dilakukan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran beberapa kemungkinan jawaban untuk memecahkan masalah secara aktual (*up to date*) melalui pengumpulan dan pengklasifikasian data, analisis, serta interpretasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Penggunaan Vinase Sebagai Bahan Pupuk

Menurut Ekawati & Saputri (2018), vinase yang telah mengalami proses pengolahan (vinase terolah/VT) dapat dimanfaatkan sebagai POC untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman. Salah satu jenis tanaman yang umum diberi vinase adalah tebu, mengingat 40% produksi bioetanol dunia berasal dari tebu dan bit (European Biofuels Technology Platform, 2010). Pemanfaatan vinase sebagai POC untuk tebu tentu mendukung konsep ekonomi sirkuler (*circular economy*) yang memproses limbah organik menjadi bahan yang dapat digunakan kembali (Afrianto *et al.*, 2021; Putra *et al.*, 2021b; Dewi *et al.*, 2022b). Pemanfaatan vinase untuk pemupukan tebu juga merupakan langkah strategis mengingat tebu termasuk jenis komoditas penting dan bernilai ekonomi tinggi di Indonesia (Putra, 2020; Ranomahera *et al.*, 2020).

Aplikasi vinase ke lahan tebu melalui fertigasi merupakan langkah yang umum diterapkan di berbagai negara (Pita *et al.*, 2010; Sydney, 2013; Gurgel *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2015; Cassman *et al.*, 2018). Vinase dapat digunakan sebagai pupuk untuk tebu karena mengandung BO dan kalium (K) dalam jumlah tinggi (Gómez & Rodríguez, 2000; Silva *et al.*, 2015; Bonomi *et al.*, 2016; Cassman *et al.*, 2018), nitrogen (N) dan fosfor (P) dalam jumlah sedang atau moderat (Gómez & Rodríguez, 2000), serta beberapa unsur hara lainnya (Silva *et al.*, 2015).

Aplikasi vinase ke lahan tebu dapat memicu lingkungan tanah yang baik untuk menopang pertumbuhan dan produktivitas tebu (Jiang *et al.*, 2012). Vinase meningkatkan produktivitas tebu, di mana hasil tanaman dan hasil gula per hektar meningkat (Gómez & Rodríguez, 2000). Hasil tebu yang tinggi berkat aplikasi vinase berkaitan dengan meningkatnya ketersediaan N dan K total (de Resende *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2015) serta mikronutrien di bawah kondisi tanah agak masam (Yang *et al.*, 2013). Dari sebuah penelitian selama tiga tahun pada tanaman baru (*plant cane*) dan keprasan (*ratoon cane*), aplikasi vinase bersama dengan pupuk mineral diketahui memberikan hasil tebu yang lebih tinggi dibandingkan pupuk mineral sendiri (Soobadar & Ng Kee Kwong, 2012).

Cardin *et al.* (2016) menemukan bahwa aplikasi vinase dapat meningkatkan konsentrasi K di lapisan tanah hingga sedalam 40 cm. Di banyak negara, vinase diaplikasikan ke perkebunan tebu sebagai bahan substitusi pupuk anorganik (PA) terutama menggantikan unsur K (Dametie *et al.*, 2014). Secara luas, vinase digunakan sebagai bahan fertigasi untuk menggantikan pupuk K (Prado *et al.*, 2013; Cardin *et al.*, 2016; Cipriano *et al.*, 2019). Bonomi *et al.* (2016) menemukan bahwa kandungan K dalam vinase dapat menggantikan 100% K dari pupuk mineral pada tanaman tebu ratun. de Oliveira (2018) menyebut bahwa vinase dapat mensubstitusi pupuk K secara penuh dan pupuk P secara sebagian. de Moraes *et al.* (2009) menyebutkan bahwa vinase dapat menggantikan pupuk K dan sulfur (S) secara total dalam budidaya tebu, namun hanya dapat menggantikan N secara parsial. Kandungan N dalam vinase hanya dapat mensubstitusi 20% N dari pupuk mineral pada tanaman tebu ratun (Bonomi *et al.*, 2016). Gómez & Rodríguez (2000) mengamati bahwa aplikasi $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vinase dapat mensubstitusi 55% N, 72% P_2O_5 dan 100% K_2O . Mereka juga menemukan bahwa dengan penggunaan vinase, hasil tebu tanpa tambahan PA masih tergolong tinggi. Namun, mereka juga menemukan bahwa vinase yang diaplikasikan bersamaan dengan PA menghasilkan produksi tebu yang lebih tinggi. Pita *et al.* (2010) berpendapat bahwa tambahan pupuk N tetap diperlukan setelah vinase diaplikasikan ke tanah.

Apabila ditinjau dari aspek ekonomi, fakta bahwa vinase dapat mensubstitusi pupuk K tentu sangat menarik. Hal ini karena pemupukan K dalam budidaya tebu biasanya menggunakan PA dalam jumlah yang cukup besar, termasuk KCl, yang biayanya tidak murah (de Moraes *et al.*, 2009). Penggunaan PA secara ekssesif juga dapat menyebabkan degradasi serta pencemaran tanah dan air (Ariffien *et al.*, 2022). Saat ini, budidaya tanaman dengan meminimalkan material kimia mulai menjadi isu penting untuk mewujudkan pertanian berkelanjutan (Afrianto *et al.*, 2022).

Tebu merupakan tanaman yang ‘rakus hara’ sehingga dibutuhkan tambahan unsur hara (Putra *et al.*, 2021c). Kecukupan unsur hara diperlukan supaya tebu dapat tumbuh dan berkembang

dengan optimal (Puspitasari *et al.*, 2022; Puspitasari *et al.*, 2023). Berdasarkan Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 53, dosis umum N, P, dan K yang dibutuhkan untuk memproduksi tebu per 1.000 ku ha⁻¹, yaitu ± 150 kg K₂O, ± 150 kg N, dan ± 105 P₂O₅.

Dampak Positif Aplikasi Vinase terhadap Lingkungan dan Tanaman Tebu

Beberapa dampak positif aplikasi vinase terhadap sifat fisik tanah, antara lain meningkatkan total porositas dan porositas kapiler di lapisan bajak tanah (Jiang *et al.*, 2012; Prado *et al.*, 2013). Setelah aplikasi vinase secara terus menerus, fraksi pasir tanah meningkat, sedangkan fraksi lempung menurun (Jiang *et al.*, 2012). Aplikasi vinase juga dapat meningkatkan persentase agregat tanah besar yang stabil terhadap air, di mana hal ini terkait dengan ketersediaan kelembapan tanah dan kandungan BO yang cukup oleh vinase (Jiang *et al.*, 2012). Aplikasi vinase juga membantu meningkatkan kadar air tanah (Seddik *et al.*, 2016).

Beberapa dampak positif aplikasi vinase terhadap sifat kimia tanah, antara lain meningkatkan kesuburan tanah (terutama BO, K, dan N) (Jiang *et al.*, 2012; Soobadar & Ng Kee Kwong, 2012; Yang *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2019), meningkatkan kandungan P tanah (Yang *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2019), serta meningkatkan stok karbon (C) tanah terutama hingga kedalaman 30 cm (akumulasi C hingga 0,55 Mg ha⁻¹ tahun⁻¹). Peningkatan C tanah ini disebabkan karena vinase meningkatkan produksi biomasa tebu sehingga input BO dan unsur hara juga meningkat (Zani *et al.*, 2018). Cardin *et al.* (2016) menemukan bahwa aplikasi vinase ke lahan tebu meningkatkan kandungan C organik dan stok total C pada tanah dengan kedalaman 0-10 cm. Dengan demikian, vinase berpotensi digunakan sebagai POC untuk meningkatkan kesuburan tanah (Wei *et al.*, 2015) dan bahkan dapat mensubstitusi pupuk kimia dalam budidaya tebu (Yang *et al.*, 2013). Vinase dapat mengurangi 50% PA dalam menyuplai K ke lahan pertanian (Fuess *et al.*, 2017).

Aplikasi vinase juga memberikan beberapa dampak positif terhadap sifat biologis tanah, antara lain meningkatkan populasi jamur, bakteri, dan terutama *actinomycetes* (bakteri gram positif) dalam tanah (Prado *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013). Vinase menjadi substrat yang memacu pertumbuhan mikroorganisme karena mengandung mikronutrien dalam jumlah tinggi (Sydney, 2013). Vinase juga meningkatkan keragaman jenis bakteri di tanah dan mempromosikan spesies yang berpartisipasi dalam siklus N dan besi (Omori *et al.*, 2016). Meng *et al.* (2009) menemukan bahwa penambahan vinase meningkatkan populasi bakteri dan jamur tanah serta populasi *actinomycetes*. Dalam sebuah penelitian, mineralisasi N oleh aktivitas mikroba menjadi lebih tinggi, ditunjukkan oleh rasio C/N yang rendah (Yang *et al.*, 2013). Menurut Permana *et al.* (2023), keanekaragaman hayati pada suatu ekosistem tanah merupakan indikator utama kesehatan tanah untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman, di mana masing-masing organisme memiliki peranan penting pada ekosistem tanah.

Berbagai dampak positif aplikasi vinase ke lahan tebu terhadap kualitas fisik, kimia, maupun biologis tanah (Prado *et al.*, 2013) pada akhirnya dapat membantu meningkatkan produksi tebu (Gómez & Rodríguez, 2000; Prado *et al.*, 2013). Aplikasi vinase dalam jumlah moderat dapat meningkatkan hasil tebu mulai 10 hingga 65% (Vadivel, 2014). Gómez & Rodríguez (2000), misalnya, menemukan bahwa vinase meningkatkan produktivitas tebu karena hasil tanaman dan haur per hektar meningkat signifikan. Mereka menemukan hasil tertinggi diperoleh ketika 50 m³ ha⁻¹ of vinase diaplikasikan ke tanaman pertama (*plant cane*) dan 100 m³ ha⁻¹ of vinase diaplikasikan ke tanaman keprasan pertama dan kedua. Proyeksi jangka panjang oleh Zani *et al.* (2018) menunjukkan kenaikan hasil tebu dengan aplikasi vinase.

Dampak Negatif Aplikasi Vinase terhadap Lingkungan dan Tanaman Tebu

Dampak negatif dapat terjadi apabila VM diaplikasikan tanpa diolah dan dalam jangka waktu panjang (Dewi *et al.*, 2022a). Aplikasi VM secara langsung dan terus menerus ke tanah dan badan air dapat menyebabkan permasalahan lingkungan serius (Prado *et al.*, 2013; Prasad & Shih, 2016; Fuess *et al.*, 2017; Singh & Tiwari, 2018), meskipun aplikasi VM dalam jangka waktu pendek menguntungkan (beberapa bulan hingga tahun) bagi pertumbuhan tanaman tebu (Fuess *et al.*,

2017), serta kualitas tanah (Cassman *et al.*, 2018). Hal ini mengindikasikan pentingnya mengolah vinase terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai sumber pupuk.

Vinase masih memiliki nilai ekonomi negatif dan efek negatif terhadap lingkungan (Johansson *et al.*, 1993). Hal ini disebabkan karena karakteristik polutan itu sendiri (Fuess *et al.*, 2017), di mana VM mengandung BO yang sangat tinggi dan beberapa material kimia (Hazbavi & Sadeghi, 2016; Fuess *et al.*, 2017; Mulyanto, 2018). Masalah lain VM adalah memiliki pH rendah (Prado *et al.*, 2013) serta BOD (mencapai 17.000 mg O₂ L⁻¹) dan COD (mencapai 29.000 mg O₂ L⁻¹) yang tinggi (Prado *et al.*, 2013; Pandey *et al.*, 2018) sehingga merupakan polutan dengan kadar 100 kali lipat lebih tinggi daripada limbah domestik (Christofolletti *et al.*, 2013; Pandey *et al.*, 2018). VM juga menimbulkan aroma tidak sedap yang menyengat (Prasad & Shih, 2016).

Aplikasi VM ke lahan dalam jangka panjang dapat mengakibatkan terjadinya pencemaran tanah, air permukaan, bahkan udara. VM dapat membanjiri pori-pori tanah sehingga mengurangi aerasi tanah (Moran-Salazar *et al.*, 2016). VM juga dapat memicu terjadinya kejenuhan tanah terhadap P anorganik, garam, ion-ion, dan beberapa komponen lain yang dihasilkan selama dekomposisi BO (Moran-Salazar *et al.*, 2016). Dengan demikian, jumlah BO berlebih pada VM akan menyebabkan penyumbatan pori tanah. Apabila kandungan oksigen dan pH tanah menjadi sangat rendah, VM dapat menurunkan aktivitas mikroba tanah (keragaman relatif dari spesies yang dominan) (Prasad & Shih, 2016; Yin *et al.*, 2019).

Aplikasi VM di tanah yang sama setiap tahunnya, bahkan dalam jumlah yang sedikit, dapat menyebabkan kejenuhan kation, terutama (kejenuhan K) dalam KTK tanah dan menyebabkan pencucian (*leaching*) konstituen tanah tersebut ke badan air. Pada tanah lempung yang dalam, terdapat sebuah lapisan tanah yang lebar untuk absorpsi K. Sebuah studi menginvestigasi *leachate* dari suatu tanah yang telah diaplikasikan 800 m³ ha⁻¹ VM. Hasilnya, tidak terdapat perpindahan K⁺ di tanah dengan kedalaman lebih dari 40 cm. Tanaman tebu (terutama ratun) memiliki sistem perakaran yang dalam, sehingga K dapat digunakan meski tercuci ke lapisan tanah dalam. Sebenarnya, pencucian unsur K ke badan air bukan tergolong masalah lingkungan mengingat K bukan polutan, namun kelebihan K dalam larutan tanah pada kompleks pertukaran kation dapat menstimulasi pencucian nitrat sebagai KNO₃. (Singh & Tiwari, 2018). Pencucian N dapat menyebabkan kehilangan kesuburan tanah (Cassman *et al.*, 2018).

Aplikasi VM menyebabkan peningkatan pH tanah dan badan air akibat proses pengasaman dari BO tinggi (Yang *et al.*, 2013; Fuess *et al.*, 2017; Mulyanto, 2018; Yin *et al.*, 2019). Jika terjadi demikian, tanah dapat kehilangan kesuburan (Mulyanto, 2018). Selain itu, VM dapat menyebabkan salinitas tanah (Hazbavi & Sadeghi, 2016; Moran-Salazar *et al.*, 2016; Fuess *et al.*, 2017), meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa kenaikan level salinitas ini tidak terlalu signifikan dan hanya bersifat sementara (Soobadar & Ng Kee Kwong, 2012). Dalam sebuah studi di Meksiko, VM menyebabkan salinitas tanah dan kontaminasi zinc (Zn) dan Mangan (Mn) (Prado *et al.*, 2013). VM juga mengandung ion-ion seperti Cl⁻ dan NO₃⁻ yang berlimpah serta logam berat seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), dan Zn (Prasad & Shih, 2016). Dengan demikian, potensi efek negatif VM setelah diaplikasikan ke tanah sebaiknya diobservasi secara berkala setelah aplikasi yang pertama (Moran-Salazar *et al.*, 2016).

Aplikasi VM dapat mencemari air permukaan (*surface water*) (Mulyanto, 2018), di mana kelebihan unsur N dan P oleh aplikasi VM dalam dosis tinggi dapat menyebabkan terjadinya eutrofikasi di badan air (de Resende *et al.*, 2006; Moran-Salazar *et al.*, 2016). Dengan demikian, perairan yang terdampak dapat kehilangan fungsinya sebagai tempat hidup ikan dan mikroorganisme aerobik lainnya (de Resende *et al.*, 2006; Mulyanto, 2018). Badan air akan bersifat asam dan mengalami kekurangan oksigen yang ditunjukkan rendahnya nilai oksigen terlarut di dalam air (Mulyanto, 2018). Meskipun demikian, besarnya tingkat pencemaran ke badan air tergantung pada beberapa faktor seperti komposisi dan permeabilitas tanah yang dapat memengaruhi kecepatan perpindahan kontaminan ke badan air, kedalaman badan air, relief wilayah, hujan atau irigasi, pH tanah, BO tanah, dan komposisi VM (Prasad & Shih, 2016).

VM juga dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) (Christofolletti *et al.*, 2013; Moraes *et al.*, 2017) sebagai hasil dari kandungan BO yang tinggi (Moran-Salazar *et al.*, 2016). Ketika VM diaplikasikan bersamaan dengan pupuk N, emisi terbesar adalah gas N₂O (Cassman *et al.*, 2018) sehingga diperlukan pengolahan VM (Rodrigues Reis & Hu, 2017).

VM juga berpotensi membawa kontaminasi mikroba. Dalam proses produksi bioetanol di pabrik, perusahaan umumnya menambahkan bahan-bahan seperti asam sulfur, biosida kimia, dan antibiotik untuk mencegah kontaminasi bakteri. Oleh karena itu, penting untuk melihat apakah bahan-bahan tersebut masih tetap terkandung di dalam VM yang dihasilkan atau tidak. VM yang mengandung bahan-bahan tersebut berpotensi menyebabkan resistensi gen mikroba tanah sehingga diperlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan (Braga *et al.*, 2017).

Selain menyuburkan tebu, aplikasi VM juga dapat membawa dampak negatif terhadap pertumbuhan tebu jika diaplikasikan secara kontinu dalam jangka waktu panjang. Hal ini terjadi bila tanah mengalami kondisi anoksis setelah aplikasi VM, sehingga dapat menghambat pertumbuhan tebu (de Resende *et al.*, 2006). Aplikasi VM juga berpotensi menurunkan kualitas tebu. Dalam sebuah penelitian yang melibatkan 16 varietas tebu yang ditanam dengan dan tanpa irigasi VM (dosis 100 m³ ha⁻¹ yang setara dengan 590 kg/ha K₂O), diketahui bahwa aplikasi VM ke tanah terutama dengan kandungan K tinggi menghambat kemasakan tanaman, mengurangi kandungan sukrosa dan fiber tanaman, serta menstimulus akumulasi abu dalam jus tebu yang akhirnya mengurangi produksi gula (Singh & Tiwari, 2018). Padahal, salah satu masalah industri gula di Indonesia adalah kualitas tebu giling yang rendah (Puspitasari *et al.*, 2024).

Upaya-Upaya Mengurangi Dampak Negatif Vinase Mentah

1. Pengaturan Jumlah dan Konsentrasi Vinase yang Diaplikasikan ke Lahan

Salah satu solusi pemanfaatan VM supaya aman digunakan untuk budidaya tebu adalah dengan mengatur jumlah VM yang masuk ke lahan. Tidak sedikit studi yang mempelajari konsentrasi VM (Singh & Tiwari, 2018). Di satu sisi, penggunaan vinase dapat menyebabkan efek negatif terhadap tanah dan badan air. Di sisi lain, penggunaan rasional VM tidak akan menyebabkan risiko lingkungan. Tergantung pada jumlah yang diaplikasikan, VM dapat berfungsi sebagai polutan atau pupuk tanaman yang bermanfaat (Prado *et al.*, 2013).

VM yang diaplikasikan ke lahan pertanian harus sesuai jumlahnya, di mana nilainya bervariasi sesuai dengan karakteristik tanah (Prado *et al.*, 2013; Sydney, 2013). Rekomendasi spesifik sebaiknya diikuti untuk suatu wilayah untuk mencegah penggunaan berlebihan dan pelarutan mineral, misalnya nitrat dan K, serta kontaminasi air tanah. Aplikasi VM yang tepat harus mempertimbangkan karakter kimia dan fisik tanah, serta aspek lain seperti sejarah aplikasi residu, intensitas budidaya di lahan pertanian, dan jarak dengan sumber air (Prado *et al.*, 2013). Aplikasi VM di lahan tebu juga memerlukan rekomendasi spesifik untuk setiap kondisi pedoklimatis untuk mencegah kerusakan lingkungan (Prado *et al.*, 2013). Kontaminasi badan air oleh VM dapat terjadi pada kondisi tertentu, terutama jika dosisnya sangat tinggi atau saat diaplikasikan pada tanah berpasir atau dangkal (Singh & Tiwari, 2018).

Untuk keperluan pupuk, volume VM yang dapat diaplikasikan berkisar 60.000 hingga 300.000 L ha⁻¹ tergantung dari konsentrasi VM yang digunakan (de Oliveira, 2018). Sadewo (2017) menemukan bahwa penggunaan VM dengan dosis ± 12.000 L ha⁻¹ dapat mensubstitusi pupuk K sebesar 100% (setara 200 kg KCl ha⁻¹). Adapun VM yang dihasilkan dari molases memiliki konsentrasi K lebih tinggi dibandingkan dari sumber lain seperti sari tebu (*juice*) (Gurgel *et al.*, 2015; de Oliveira, 2018). VM dari molases juga mengandung limbah mineral terlarut, P, Ca, Mg, Na, Mn, dan Zn yang lebih tinggi daripada sumber lainnya (Gurgel *et al.*, 2015).

Pengaturan konsentrasi VM juga termasuk pengenceran. Armengol *et al.* (2003) dan Chandaju *et al.* (2010) menemukan bahwa pengenceran VM dapat memperkecil pengaruh kurang baik dari VM terhadap lingkungan.

2. Pengolahan Vinase Mentah

Meskipun pengaturan konsentrasi VM dapat menjadi solusi untuk mengurangi dampak VM terhadap tanaman tebu dan lingkungan, namun pengolahan VM menjadi VT tetap menjadi solusi terbaik dan sangat disarankan. Dampak negatif aplikasi VM dapat diminimalkan dengan perlakuan tertentu, seperti teknologi aerobik dan anaerobik untuk menghilangkan BO, nitrat, dan padatan terlarut (Prado *et al.*, 2013). Vinase harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan terbuka untuk menghindari pencemaran lingkungan (Mulyanto, 2018). Senada dengan hal tersebut, Putra *et al.* (2020) dan Putra *et al.* (2021a) juga menyatakan bahwa vinase harus diolah agar tidak menyebabkan pencemaran lingkungan. Bagaimana pun juga, vinase merupakan limbah industri yang mengandung berbagai zat kimia yang dapat membahayakan kesehatan ekosistem (Azmi *et al.*, 2022; Darmayani *et al.*, 2022). Dari perspektif ekonomi global, budidaya tebu dapat menghasilkan keuntungan tinggi dengan aplikasi VT dibandingkan VM (Moraes *et al.*, 2014).

Terdapat beberapa perbedaan sifat fisik VM dan VT beserta dampaknya terhadap lingkungan (Tabel 1).

Tabel 1. Perbandingan Sifat Fisik dan Dampak Lingkungan dari Aplikasi Vinase Mentah vs Terolah

Aspek yang dibahas		Jenis vinase		Referensi
		Vinase mentah	Vinase terolah	
Karakteristik fisik vinase	Sifat biokimia substrat	Kurang stabil	Lebih stabil	Mulyanto (2018)
	COD	Tinggi (umumnya 29.000 mg O ₂ L ⁻¹ , tapi dapat mencapai 45.000 mg O ₂ L ⁻¹)	Dapat diturunkan hingga sebesar 54-83%	Silva & Abud (2016); Pandey <i>et al.</i> (2018)
	BOD	Tinggi, umumnya 17.000 mg O ₂ L ⁻¹)	Dapat diturunkan	Salomon <i>et al.</i> (2011); Pandey <i>et al.</i> (2018)
	pH	Rendah/asam (4,4 – 4,6)	Lebih tinggi	Silva & Abud (2016)
	Kandungan N dan K	Tinggi	Tinggi (dapat dipertahankan sehingga kurang lebih sama dengan vinase mentah)	Christofolletti <i>et al.</i> (2013); Silva & Abud (2016)
	Kandungan bahan organik (<i>organic matter</i>)	Tinggi	Dapat diturunkan	Christofolletti <i>et al.</i> (2013); Silva & Abud (2016); Mulyanto (2018)
	Aroma	Tidak sedap dan berpotensi mengganggu masyarakat sekitar	Aroma tajam dapat dikurangi	Mulyanto (2018)
	Kandungan sulfat	Tinggi	Dapat dihilangkan atau setidaknya dikurangi menjadi sulfit	Moraes <i>et al.</i> (2014)
	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , dan logam berat (Cu, Pb, dan Zn)	Tinggi	Dapat dihilangkan atau dikurangi	Prasad & Shih (2016)
Dampak vinase	pH tanah	Menurunkan pH tanah	Dapat ditinggikan atau dinetralkan	Silva & Abud (2016)

Aspek yang dibahas		Jenis vinase		Referensi
		Vinase mentah	Vinase terolah	
terhadap lingkungan setelah diaplikasikan ke lahan pertanian	Pori tanah	Penyumbatan pori tanah menyebabkan kadar O ₂ terbatas, sehingga dapat mematikan organisme tanah	Efeknya dapat lebih rendah	Prasad & Shih, 2016
	Potensi pencemaran air tanah	Tinggi	Dapat diturunkan	Moraes <i>et al.</i> (2014)
	Potensi polusi tanah	Tinggi karena Cl ⁻ dan NO ₃ ⁻ berlimpah, serta adanya logam berat seperti Cu, Pb, dan Zn	Dapat diturunkan	Moraes <i>et al.</i> (2014); Prasad & Shih (2016).
	Potensi emisi gas rumah kaca (CH ₄ , N ₂ O)	Tinggi	Emisi CH ₄ dan N ₂ O lebih rendah	Moraes <i>et al.</i> (2017)
	Potensi pemanasan global	Ada	Dapat diturunkan	Moraes <i>et al.</i> (2014)
	Potensi pencucian sulfat, logam, dan unsur hara lain	Tinggi	Dapat diturunkan	Moraes <i>et al.</i> (2014)

Menurut Mulyanto (2018), terdapat beberapa manfaat pengolahan VM. Beberapa manfaat tersebut, antara lain 1) memanfaatkan kandungan BO yang terkandung di dalam VM menjadi produk bermanfaat seperti POC dan biogas, 2) menurunkan kadar BO sehingga dapat digunakan sebagai POC dengan atau tanpa penambahan unsur hara makro dan mikro, 3) tercapainya proses stabilisasi biokimia, dan 4) mengurangi aroma tidak sedap yang muncul akibat perombakan BO secara anaerobik yang dapat mengganggu masyarakat di sekitar pabrik.

Sebelum diaplikasikan ke lahan pertanian, VM dapat diolah terlebih dahulu di dalam reaktor anaerobik, yang kemudian akan menghasilkan biogas dan *biofertilizer* (Bhaskar *et al.*, 2018). Pengolahan secara anaerobik menjadi salah satu metode pengolahan limbah yang paling sering digunakan karena biaya operasional dan produksi lumpur yang rendah, serta dapat dihasilkannya produk samping berupa metan untuk biogas (Robles-González *et al.*, 2012; Moraes *et al.*, 2017). Salah satu cara pengolahan VM secara anaerob yaitu menggunakan Digester Unggun Tetap (*Fixed Bed Digester*) (Mulyanto, 2018). VT yang melalui proses anaerobik mendukung pelestarian sumber daya dan proteksi lingkungan (Johansson *et al.*, 1993).

Pada dasarnya, VM merupakan suspensi kaya unsur hara yang bersifat polutan, tetapi vinase yang telah diolah menjadi VT berpotensi mengurangi efek pencemaran tersebut (Rodrigues Reis & Hu, 2017). Hal ini disebabkan karena proses pengolahan anaerobik dapat membantu mengurangi BO, BOD, dan COD dengan efisiensi tinggi (Cabrera-Díaz *et al.*, 2016). BO yang terkandung dalam VM dapat dihilangkan dengan cepat dalam reaktor anaerobik, sehingga dapat meminimalkan risiko pencucian logam dan unsur hara. Selama proses pengolahan secara anaerobik, sulfat dapat juga dihilangkan dari VM, atau setidaknya dikurangi menjadi sulfit. Penghilangan sulfat ini dapat menguntungkan fertisasi dengan mencegah potensi efek negatif terhadap lingkungan melalui pencucian sulfat (Moraes *et al.*, 2014).

Kadar BOD pada VT yang telah diolah secara anaerobik dapat berkurang signifikan, sehingga fertisasi lahan pertanian dengan VT menjadi lebih aman (Salomon *et al.*, 2011). Silva dan Abud (2016) menemukan potensi menjanjikan dari VT yang telah melalui proses pengolahan anaerobik sebagai *biofertilizer* untuk aplikasi ke lahan pertanian. Di bawah kondisi anaerobik,

mereka berhasil mengurangi kadar COD VM sebesar 54-83% dan kandungan bahan padat (*total solid contents*) sebesar 52-87%. Mereka juga menemukan bahwa kondisi terbaik untuk pengolahan VM adalah pada suhu udara 30-35°C, konsentrasi inokulum 0,5%, dan pH 6-7.

Setelah melalui proses pengolahan anaerobik, akan diperoleh substrat stabil yang dapat digunakan sebagai POC. Sebaiknya, diupayakan untuk mengolah VM hingga didapatkan VT stabil yang ramah lingkungan, terutama untuk aplikasi di lahan pertanian dan perkebunan (Mulyanto, 2018). VT yang diolah secara anaerobik dapat mengalami penurunan BO secara substansial, namun tetap mempertahankan kandungan NPK-nya, sehingga masih baik apabila digunakan untuk fertigasi di lahan tebu (Salomon *et al.*, 2011; Christofolletti *et al.*, 2013; Silva & Abud, 2016; Bhaskar *et al.*, 2018). Bahkan, kandungan hara dapat ditingkatkan dalam pengolahan vinase secara anaerobik sehingga baik untuk dipakai sebagai pupuk (Salomon *et al.*, 2011).

Moraes *et al.* (2014) menemukan bahwa fertigasi dengan VT yang telah diolah secara anaerobik dapat mengurangi efek negatif terhadap lingkungan (menurunkan jumlah polutan dan bahkan potensi pemanasan global). Mereka juga menyatakan bahwa VT yang telah melalui proses pengolahan secara anaerobik dapat menurunkan risiko kontaminasi air tanah.

Moraes *et al.* (2017) menemukan emisi CH₄ kumulatif sebesar 43,8 kg CO₂ eq kg⁻¹ selama 21 hari penyimpanan VM, sedangkan tidak ada emisi CH₄ yang dihasilkan dari VT yang telah diolah secara anaerobik. Mereka menemukan bahwa emisi NO₂ dari VT yang telah diolah secara anaerobik 78% lebih rendah daripada VM ketika diaplikasikan ke lahan. Mereka berpendapat bahwa perbedaan emisi GRK yang dihasilkan antara VM dan VT berkaitan dengan karakter biokimianya.

Pengolahan VM secara anaerobik memiliki beberapa kelemahan. Proses pengolahan anaerobik seringkali belum cukup untuk menyelesaikan masalah BO, kepekatan warna, dan kandungan komponen rekalsitran VM yang terlalu tinggi dan melampaui ambang batas aman terhadap lingkungan (Cabrera-Diaz *et al.*, 2016). Pengolahan anaerobik tidak dapat mendegradasi melanoidins, senyawa persisten yang menyebabkan warna coklat VM (Cardona *et al.*, 2013). Hasil pengolahan dengan proses anaerobik juga masih menimbulkan aroma tidak sedap (Said & Firly, 2018). Kekurangan lain pengolahan VM secara anaerobik adalah membutuhkan periode inkubasi yang panjang untuk proses awal pengolahannya. Hal ini disebabkan karena musim giling industri gula bersifat musiman dan potensi ketiadaan mikroorganisme yang dapat melakukan perombakan anaerobik. Selain itu, masalah operasional lain seperti tingkat pertumbuhan yang lambat dari bakteri anaerobik dan hilangnya biomassa dalam sistem dengan laju hidrolik yang tinggi seringkali menyebabkan pemurnian VM menjadi kurang memuaskan (Santal & Singh, 2013).

Secara teknis, pengolahan VM secara anaerobik tidak selalu mudah. Beberapa faktor dapat menjadi penghambat kuat pengolahan anaerobik VM, termasuk jika VM tersebut memiliki nilai COD di atas 100 kg m⁻³, dan level tinggi metal ringan (Na⁺ dan Ca²⁺ di atas 8 kg m⁻³ dan K di atas 12 kg m⁻³) (Cardoso, 2014). Pengolahan VM secara anaerobik rentan terhadap gangguan, misalnya efisiensi pengolahannya menjadi rendah pada suhu rendah (Weiss, 2016).

Naspolini *et al.* (2017) melaporkan bahwa penghambatan oleh konsentrasi sulfat yang tinggi merupakan masalah umum dalam pengolahan anaerobik VM. Pengolahan anaerobik VM yang kaya S dapat menyebabkan berbagai efek yang tidak diinginkan, yaitu: a) Bakteri pereduksi sulfat (*sulfate reducing bacteria*/SRB) kalah bersaing dengan mikroba metanogen (mikroba pembentuk gas) untuk memperoleh hidrogen dan asetat karena keuntungan termodinamik, menghasilkan sulfida, dan lebih sedikit produksi metana; b) Konsentrasi sulfat memiliki efek toksik langsung pada mikroorganisme anaerobik tertentu; dan c) Produksi dan pengendapan metal-sulfida dikenal sebagai salah satu proses terpenting yang memengaruhi ketersediaan *trace metals* untuk serapan mikroba sehingga secara negatif, memengaruhi efisiensi dan stabilitas proses pengolahan anaerobik VM (Janke, 2017). Meskipun demikian, Cardoso (2014) menyampaikan hal yang kontras, yaitu inhibisi langsung oleh sulfat jarang ditemukan.

VM mengandung fenol yang bersifat toksik terhadap bakteri sehingga menyebabkan efek penghambatan pada proses pengolahan anaerobik (Santal & Singh, 2013). Meski demikian, pengolahan anaerobik dapat digabungkan dengan *pre-treatment* oksidasi tingkat lanjut untuk

mengurangi efek penghambatan tersebut (Paz-Pino *et al.*, 2014). Ozonasi dapat digunakan sebagai langkah awal pengolahan VM untuk mengurangi kandungan komponen fenol, serta untuk mengoksidasi sebagian komponen *biodegradable* dan *non-biodegradable*. Ozonasi juga dapat meningkatkan biodegradabilitas VM (Cabrera-Diaz *et al.*, 2016).

pH VM yang terlalu rendah (antara 3-5) tidak baik untuk pengolahan anaerobik karena hal ini menandakan kapasitas *buffering* yang rendah dari medium tersebut (Naspolini *et al.*, 2017). pH rendah juga menyebabkan penghambatan total aktivitas mikroba metanogen (Naspolini *et al.*, 2017). Dengan demikian, untuk metanogenesis, diperlukan tambahan komponen alkalin untuk menetralkan keasaman tersebut melalui proses *buffering* pH ke nilai optimum untuk pengolahan anaerobik. Biaya suplementasi alkalinitas ini dapat menjadi pengeluaran utama untuk pengolahan anaerobik dari beberapa limbah industri (termasuk VM) (Janke, 2017).

Sejumlah studi berusaha mempelajari berbagai cara untuk mengolah VM (Cardona *et al.*, 2013). Pengolahan VM secara anaerobik seringkali masih menyisakan aroma tidak sedap dan BO tinggi sehingga sejumlah studi merekomendasikan kombinasi pengolahan anaerobik VM dengan ozonasi (*high ozone dosification*) atau perlakuan intermediate antara proses anaerobik dan aerobik (Cabrera-Diaz *et al.*, 2016). Pengolahan VM secara aerobik (seperti proses lumpur aktif) dipandang kurang tepat karena biaya yang mahal yang terkait dengan proses oksigenasi. Proses lumpur aktif dapat dioperasikan dengan beban sejumlah dua kilogram COD per m³ per hari, di mana jumlah ini tergolong tinggi. Meski demikian, sejumlah sepersepuluh dari beban tersebut biasanya diterapkan pada reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) sehingga sistem aerobik akan sepuluh kali lebih besar daripada reaktor UASB (Johansson *et al.*, 1993).

Rodrigues Reis dan Hu (2017) mengemukakan bahwa pengolahan biologis dapat menjadi solusi potensial penanganan VM. Dalam penelitiannya, mereka menguji VM yang diproses dengan jamur *Trametes versicolor* untuk dilihat potensinya dalam mengurangi konsentrasi fenol dan komponen *chromophoric* dalam VM. Hasilnya, terjadi penurunan COD sebesar 60%, total fenol sebesar lebih dari 80%, serta penurunan hampir 20% kepekatan warna VM. Ryznar-Luty *et al.* (2018) menemukan bahwa penambahan bakteri *Bacillus* pada saat pengolahan aerobik meningkatkan efisiensi biodegradasi VM pada berbagai perlakuan temperatur. Lebih lanjut, mereka membandingkan biodegradasi VM dengan menggunakan berbagai bakteri dari genus *Bacillus*. Mereka menemukan bahwa polutan organik utama dapat hilang pada semua perlakuan dalam waktu yang sama, tetapi dengan laju penghilangan polutan yang berbeda.

Pengolahan VM juga dapat dilakukan melalui pemanfaatan mikroalga. Mikroalga dapat mengasimilasi N anorganik sehingga merupakan pilihan yang baik untuk bioremediasi air limbah (Salgueiro *et al.*, 2016). Mikroalga merupakan kandidat yang menjanjikan untuk bioremediasi sejumlah besar limbah industri, termasuk VM (Singh & Patel, 2012). Jiang *et al.* (2023) menemukan kemampuan *Desmodesmus* sp. dalam menurunkan COD VM lebih dari 90%. Namun perlu dicatat bahwa tidak semua strain mikroalga mampu tumbuh pada media yang mengandung VM (Quintero-Dallos *et al.*, 2019). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi jenis mikrolaga yang berpotensi menjadi agen pengolahan VM.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Aplikasi vinase dapat memberikan dampak positif sekaligus negatif terhadap lingkungan dan pertumbuhan tebu. Dampak positif vinase terhadap tebu disebabkan karena kandungan unsur hara seperti N, K, serta beberapa mikronutrien. Aplikasi vinase bahkan berpotensi dapat mensubstitusi PA pada budidaya tebu. Meskipun begitu, aplikasi VM dalam jumlah berlebih dan dalam jangka waktu panjang dapat mencemari tanah dan badan air di sekitarnya. Dampak negatif VM tersebut dapat dikurangi dengan mengatur jumlah dan konsentrasi VM yang diberikan ke lahan tebu atau dengan mengolah VM tersebut. VM dapat diolah secara anaerobik, aerobik, ataupun secara biologis. BOD, COD, serta BO-nya pada VT dapat berkurang signifikan sehingga berpotensi mengurangi dampak negatif vinase terhadap lingkungan dan tanaman tebu.

Saran

Saran untuk ke depannya adalah menggencarkan penelitian lebih lanjut mengenai metode pengolahan VM yang efektif. Secara teknis, beberapa faktor dapat menjadi penghambat kuat pengolahan anaerobik VM, misalnya jika vinase memiliki BOD dan COD tinggi, pH yang terlalu rendah, serta kandungan metal, sulfat, dan fenol tinggi. Penelitian lebih lanjut juga dapat dilakukan dengan menggabungkan beberapa jenis pengolahan VM, misalnya pengolahan anaerobik VM dengan ozonasi (*high ozone dosification*), perlakuan intermediate antara proses anaerobik dan aerobik, atau dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk mendegradasi VM.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya ucapkan kepada Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI) yang telah memberikan saya kesempatan berupa waktu, dukungan yang berharga, serta sumber daya lainnya untuk menulis artikel *review* ini.

REFERENSI

- Afrianto, W. F., Hidayatullah, T., Hasanah, L. N., Putra, R. P., Diannita, R., & Anggraini, R. (2021). Urban community engagement to reduce and prevent food waste at household level. *International Journal of Community Service*, 1(3), 261-271.
- Afrianto, W. F., Putra, R. P., Aini, Y. S. (2022). Overview of the ethnobotany on the use of plants as potential botanical pesticides in Indonesia. *Jurnal Biologi Tropis*, 22(1), 230-243.
- Arifien, Y., Putra, R. P., Wibaningwati, D. B., Anasi, P. T., Masnang, A., Rizki, F. H., Suradi, A. R., Rismaya, R., Marlina, L., Anggarawati, S., Prihatini, R., Sunardi, & Indrawati, E. 2022. *Pengantar ilmu pertanian*. Padang: PT Global Eksekutif Teknologi.
- Armengol, J. E., Lorenzo, R., & Fernández, N. (2003). Use of vinasse dilutions in water as an alternative for improving chemical properties of sugar cane-planted vertisols. *Cultivos tropicales*, 24(3), 73-76.
- Azmi, Y., Yulistiyono, A., Karyasa, T. B., Putra, R. P., Salama, S. H., Thamrin, N. T., Septiadi, D., Dinata, G. F., Jumiyati, S., & Rizki, F. H. (2022). *Pertanian terpadu*. Padang: PT Global Eksekutif Teknologi.
- Bhaskar, T., Pandey, A., Mohan, S. V., Lee, D. J., & Khanal, S. K. (Eds.). (2018). *Waste biorefinery: Potential and perspectives*. Elsevier.
- Bonomi, A. Cavalett, O., Cunha, M., & Lima, M.A. (2016). *Virtual biorefinery*. Cham: Springer International Publishing.
- Braga, L. P., Alves, R. F., Dellias, M. T., Navarrete, A. A., Basso, T. O., & Tsai, S. M. (2017). Vinasse fertirrigation alters soil resistome dynamics: an analysis based on metagenomic profiles. *BioData Mining*, 10(1), 1-7.
- Cabrera-Díaz, A., Pereda-Reyes, I., Dueñas-Moreno, J., Véliz-Lorenzo, E., Díaz-Marrero, M. A., Menéndez-Gutiérrez, C. L., Olivia-Merencio, D., & Zaiat, M. (2016). Combined treatment of vinasse by an upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(4), 753-762.
- Cardona, C., Machuca-Martínez, F., & Marriaga-Cabrales, N. (2013). Treatment of vinasse by using electro-dissolution and chemical flocculation. *Ingeniería y competitividad*, 15(2), 191-200.
- Cardoso, E. L. B. (2014). *Anaerobic digestion of a very high strength and sulfate-rich vinasse: from experiments to modeling and sustainability assessment* (Doctoral dissertation, Ghent University).
- Cassman, N.A., Lourenço, K.S., do Carmo, J.B., Cantarella, H., & Kuramae, E.E. (2018). Genome-resolved metagenomics of sugarcane vinasse bacteria. *Biotechnology for Biofuels*, 11, 1-16.
- Chandrabu, S., Chidankumar, C. S., & Venkatachalapathy, R. (2010). Irrigational impact of distillery spentwash on the growth, yield and nutrients of leafy vegetables. *Bioresearch Bulletin*, 2, 83-90.

- Christofolletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752-2761.
- Cipriano, M. A., Suleiman, A. K., da Silveira, A. P., do Carmo, J. B., & Kuramae, E. E. (2019). Bacterial community composition and diversity of two different forms of an organic residue of bioenergy crop. *PeerJ*, 7, e6768.
- Damietie, A., Fantaye, A., & Teshome, Z. (2014). Estimating effect of vinasse on sugarcane through application of potassium chloride at Metahara sugarcane plantation. *Advances in Crop Science and Technology*, 2(5), 1-4.
- Darmayani, S., Tribakti, I., Musa, S., Satriawan, D., Rustiah, W., Helilusiatiningsih, N., Sahabuddin, E. S., Putra, R. P., Rahmawati, Dewadi, F. M., & Cundaningsih, N. (2023). *Kimia lingkungan*. Padang: PT Global Eksekutif Teknologi.
- de Moraes, M.M.G.A., Cai X., Ringler C., Albuquerque, B.E., Da Rocha, S.P.V., & Amorim, C.A. (2009). Joint water quantity-quality management in a biofuel production area—integrated economic-hydrologic modeling analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 502-511.
- de Oliveira, A.B. (2018). *Sugarcane technology and research*. London: IntechOpen Ltd.
- de Resende, A. S., Xavier, R. P., de Oliveira, O. C., Urquiaga, S., Alves, B. J., & Boddey, R. M. (2006). Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE Brazil. *Plant and Soil*, 281(1-2), 339-351.
- Dewi, V. A. K., Putra, R. P., & Afrianto, W. F. (2022a). Kajian potensi vinase sebagai bahan fertigasi di perkebunan tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Sang Pencerah*, 8(1), 187-201.
- Dewi, V. A. K., Putra, R. P., Haris, A., & Alam, T. (2022b). *Limbah dapur dan pemanfaatannya*. Yogyakarta: Bintang Semesta Media.
- Ekawati, R. & Saputri, L. H. (2018). Pengaruh cara pemberian pupuk organik cair vinase terhadap pertumbuhan awal bawang dayak (*Eleutherine palmifolia*). *Kultivasi*, 17(3), 760-765.
- España-Gamboa, E., Vicent, T., Font, X., Dominguez-Maldonado, J., Canto-Canché, B., & Alzate-Gaviria, L. (2017). Pretreatment of vinasse from the sugar refinery industry under non-sterile conditions by *Trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor and its effect when coupled to an UASB reactor. *Journal of Biological Engineering*, 11(1), 6.
- European Biofuels Technology Platform. 2010. Strategic research agenda 2010 update: Innovation driving sustainable biofuels. Diakses dari http://www.biofuelstp.eu/srasdd/SRA_2010_update_web.pdf.
- Fuess, L. T., Rodrigues, I. J., & Garcia, M. L. (2017). Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 52(11), 1063-1072.
- Gómez, J., & Rodríguez, O. (2000). Effects of vinasse on sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia*, 17(4), 318-326.
- Gurgel, M. N. D. A., Correa, S. T. R., Neto, D. D., & Junior, D. R. D. P. (2015). Technology for sugarcane agroindustry waste reuse as granulated organomineral fertilizer. *Engenharia Agrícola*, 35(1), 63-75.
- Hazbavi, Z., & Sadeghi, S. H. R. (2016). Potential effects of vinasse as a soil amendment to control runoff and soil loss. *Soil*, 2(1), 71-78.
- Janke, L. (2017). *Optimization of anaerobic digestion of sugarcane waste for biogas production in Brazil*. (Doctoral dissertation, Universität Rostock).
- Jiang, Y., Chen, X., Wang, Z., Deng, H., Qin, X., Huang, L., & Shen, P. (2023). Potential application of a newly isolated microalga *Desmodesmus* sp. GXU-A4 for recycling Molasses vinasse. *Chemosphere*, 328, 138616.
- Jiang, Z. P., Li, Y. R., Wei, G. P., Liao, Q., Su, T. M., Meng, Y. C., Zhang, H. Y., & Lu, C. Y. (2012). Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech*, 14(4), 412-417.
- Johansson, T. B., Kelly, H., Reddy, A. K., & Williams, R. H. (1993). Renewable energy: sources for fuels and electricity.

- Leme, R. M. & Seabra, J. E. A. (2017). Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. *Energy*, 119, 754-766.
- Meng, Q. Z., Tang, Z., Liu, G. F., Chen, L., & Wang, Y. (2009). Impact of several organic materials of sugar industry on soil microbe population in sugarcane field. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 22(2), 389-392.
- Moraes, B. S., Junqueira, T. L., Pavanello, L. G., Cavalett, O., Mantelatto, P. E., Bonomi, A., & Zaiat, M. (2014). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*, 113, 825-835.
- Moraes, B. S., Petersen, S. O., Zaiat, M., Sommer, S. G., & Triolo, J. M. (2017). Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Applied Energy*, 189, 21-30.
- Moran-Salazar, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *SpringerPlus*, 5(1), 1007.
- Mulyanto, A. (2018). Air limbah industri bioetanol berbahan baku ubi kayu sebagai bahan baku produksi biogas. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 6(3), 263-273.
- Napolini, B. F., Machado, A. C. D. O., Junior, C., Barreiro, W., Freire, D. M. G., & Cammarota, M. C. (2017). Bioconversion of sugarcane vinasse into high-added value products and energy. *BioMed Research International*, 2017.
- Omori, W. P., Camargo, A. F. D., Goulart, K. C. S., Lemos, E. G. D. M., & Souza, J. A. M. D. (2016). Influence of vinasse application in the structure and composition of the bacterial community of the soil under sugarcane cultivation. *International Journal of Microbiology*, 2016.
- Pandey, A., Lee, D. J., Chang, J. S., Chisti, Y., & Soccol, C. R. (Eds.). (2018). *Biomass, biofuels, biochemicals: Biofuels from algae*. Elsevier.
- Paz-Pino, O. L., Barba-Ho, L. E., & Marriaga-Cabrales, N. (2014). Vinasse treatment by coupling of electro-dissolution, hetero-coagulation and anaerobic digestion. *Dyna*, 81(187), 102-107.
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 53/Permentan/KB.110/10/2015 tentang Pedoman Budidaya Tebu Giling yang Baik (*Good Agricultural Practices for Sugar Cane*).
- Permana, I., Anggoro, O., Carsidi, D., Alam, S., Sihaloho, N. K., Killa, Y. M., Wida, W. O. A., Putra, R. P., Mutiara, C., Masnang, A., Wirda, Z., & Elizabeth, R. (2023). *Kesuburan tanah dan pemupukan*. Padang: PT Global Eksekutif Teknologi.
- Pita V., Vasconcelos E., Fanguiero D., Cabral F., Ribeiro H.M. (2010). Carbon and nitrogen mineralization of organic wastes from sugarcane distilleries: vinasse and yeast waste. *Carbon and nitrogen mineralization of organic wastes from sugarcane distilleries: vinasse and yeast waste*. In RAMIRAN International Conference (14th): Treatment and use of organic residues in agriculture-changes and opportunities towards sustainable management (pp. 140-143).
- Prado, R. D. M., Caione, G., & Campos, C. N. S. (2013). Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013.
- Prasad, M. N. V., & Shih, K. (Eds.). (2016). *Environmental materials and waste: Resource recovery and pollution prevention*. Academic Press.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., & Putra, R. P. (2022). Agronomic performance and productivity of sugarcane under various dosage application of biofertilizer and inorganic fertilizer. *Indonesian Sugar Research Journal*, 2(2), 56-66.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., & Putra, R. P. (2023). Aplikasi pupuk nano cair dan pengaruhnya pada fase pertumbuhan vegetatif tebu. *Indonesian Sugar Research Journal*, 3(2), 64-71.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., Putra, R. P., Widaryanto, E., Maghfoer, M. D., & Tyasmoro, S. Y. (2024). Enhancement of sugarcane maturity using glyphosate and bispyribac sodium as chemical ripeners in wet climate. *BIO Web of Conferences*, 91, 01006.
- Putra, R. P. (2020). Perkecambahan dan pertumbuhan awal budet dan budchip tebu (*Saccharum officinarum* L.) yang ditanam pada berbagai posisi mata tunas. *Jurnal Agrotek Tropika*, 8(3), 435-444.

- Putra, R. P., Arini, N., & Ranomahera, M. R. R. (2021a). Implementation of climate-smart agriculture to boost sugarcane productivity in Indonesia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 40(2), 89-102.
- Putra, R. P., Dewi, V. A. K., & Afrianto, W. F. (2021b). *Serba-serbi pertanian perkotaan*. Solok: Insan Cendekia Mandiri.
- Putra, R. P., Ranomahera, M. R. R., Arini, N., & Afrianto, W. F. (2021c). Tindakan pengembalian residu panen tebu untuk meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Buletin Tanaman Tembakau, Serat, & Minyak Industri*, 13(1), 48-66.
- Putra, R. P., Ranomahera, M. R. R., Rizaludin, M. S., Supriyanto, R., & Dewi, V. A. K. (2020). Investigating environmental impacts of long-term monoculture of sugarcane farming in Indonesia through DPSIR framework. *Biodiversitas*, 21(10), 4945-4958.
- Quintero-Dallos, V., García-Martínez, J. B., Contreras-Ropero, J. E., Barajas-Solano, A. F., Barajas-Ferrerira, C., Lavecchia, R., & Zuurro, A. (2019). Vinasse as a Sustainable Medium for the Production of *Chlorella vulgaris* UTEX 1803. *Water*, 11(8), 1526.
- Ranomahera, M. R. R., Nugroho, B. D. A., Riajaya, P. D., & Putra, R. P. (2020). Using global climate indices to predict rainfall and sugarcane productivity in drylands of Banyuwangi, East Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 21(2), 78-88.
- Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524-546.
- Rodrigues Reis, C. E., & Hu, B. (2017). Vinasse from sugarcane ethanol production: better treatment or better utilization? *Frontiers in Energy Research*, 5, 7.
- Ryznar-Luty, A., Cibis, E., & Lutosławski, K. (2018). Biodegradation of main carbon sources in vinasse stillage by a mixed culture of bacteria: influence of temperature and pH of the medium. *Water Science and Technology*, 78(4), 764-775.
- Said, N. I., & Firly, F. (2018). Uji performance biofilter anaerobik unggun tetap menggunakan media biofilter sarang tawon untuk pengolahan air limbah rumah potong ayam. *Jurnal Air Indonesia*, 1(3).
- Salomon, K. R., Lora, E. E. S., Rocha, M. H., & Almazán, O. O. (2011). Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. *Sugar Industry*, 136(4), 217-223.
- Salgueiro, J. L., Perez, L., Maceiras, R., Sanchez, A., & Cancela, A. (2016). Bioremediation of wastewater using *Chlorella vulgaris* microalgae: Phosphorus and organic matter. *International Journal of Environmental Research*, 10(3), 465-470.
- Santal, A. R., & Singh, N. P. (2013). Biodegradation of melanoidin from distillery effluent: Role of microbes and their potential enzymes. Diakses dari <https://www.intechopen.com/books/biodegradation-of-hazardous-and-special-products/biodegradation-of-melanoidin-from-distillery-effluent-role-of-microbes-and-their-potential-enzymes>.
- Seddik, W. M. A., Osman, M. A., & Kenawy, M. H. M. (2016). Utilization of vinasse and feldspar as alternative sources of potassium fertilizers and their effect on some soil properties and crop yield in sandy soils. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering Mansoura Univ.*, 7(9), 669-675.
- Soobadar, A., & Ng Kee Kwong, K. R. (2012). Impact of high rates of vinasse on some pertinent soil characteristics and on sugarcane yield in Mauritius. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(1), 36-53.
- Silva, C. E. D. F., & Abud, A. K. D. S. (2016). Anaerobic biodigestion of sugarcane vinasse under mesophilic conditions using manure as inoculum. *Revista Ambiente & Agua*, 11(4), 763-777.
- Silva, J., Cazetta, J., & Togoro, A. (2015). Soil change induced by the application of biodigested vinasse concentrate, and its effects on growth of sugarcane. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(2), 249-254.
- Singh, N. K., & Patel, D. B. (2012). Microalgae for bioremediation of distillery effluent. *Farming for food and water security*, pp. 83-109.
- Singh, P., & Tiwari, A. K. (Eds.). (2018). *Sustainable sugarcane production*. CRC Press.
- Sydney, E. B. (2013). *Valorization of vinasse as broth for biological hydrogen and volatile fatty acids production by means of anaerobic bacteria* (Doctoral dissertation, Clermont-Ferrand 2).

- Vadivel, R., Minhas, P. S., Suresh P. K., Yogeswar, S., Nageshwar, D. V. K., & Nirmale, A. (2014). Significance of vinasse waste management in agriculture and environmental quality: Review. *African Journal of Agricultural Research*, 9(38), 2862-2873.
- Wei, M. M., Xu, G. P., Guo, H. R., Wang, X. F., & Chen, L. J. (2015). Effect of vinasse application on soil in sugarcane fields. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 700, pp. 270-275). Trans Tech Publications.
- Weiss, B. J. (2016). Evaluating the anaerobic codigestion potential of stillage and dairy manure in a tubular digester (Master thesis, Michigan Technological University).
- Yang, S. D., Liu, J. X., Wu, J., Tan, H. W., & Li, Y. R. (2013). Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane. *Sugar Tech*, 15(2), 152-158.
- Yin, J., Deng, C. B., Wang, X. F., Chen, G. L., Mihucz, V. G., Xu, G. P., & Deng, Q. C. (2019). Effects of long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. *Sugar Tech*, 21(1), 62-70.
- Zani, C. F., Barneze, A. S., Robertson, A. D., Keith, A. M., Cerri, C. E., McNamara, N. P., & Cerri, C. C. (2018). Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. *PeerJ*, 6, e5398.