

PEMANFAATAN NANOTEKNOLOGI: PENGARUH NANOPARTIKEL OKSIDA LOGAM TERHADAP PRODUKSI BIOETANOL PADA LIMBAH CAIR POME SECARA ANAEROB

ZAHRUL ICHSAN¹, MINDRIANY SYAFILA², ANDRI GUMILAR²

1. Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
 2. Kelompok Keahlian Rekayasa Air dan Limbah Cair, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
- Email : 25321322@mahasiswa.itb.ac.id

ABSTRAK

Limbah pome dapat menjadi sumber energi alternatif untuk produksi biogas melalui pengolahan secara anaerob, keuntungan dari pengolahan anaerob dari segi biaya lebih murah. Mikroorganisme memanfaatkan limbah pome sebagai substrat dan kultur campuran bakteri anaerobik untuk produksi bioetanol pada tahap fermentasi, dengan penambahan mikronutrien logam atau oksida logam nanopartikel. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati dampak nanopartikel terhadap efisiensi fermentasi anaerob untuk pembentukan bioetanol. Rancangan penelitian melalui percobaan skala laboratorium, menggunakan circulating bed reactor sistem batch. Perlakuan awal berupa proses seeding dan karakterisasi limbah. Pengujian total asam volatile serta bioetanol selama reaktor beroperasi 30 jam. Hasil penelitian menunjukkan variasi penambahan mikronutrien dengan jenis oksida logam nanopartikel FeO dan NiO memaksimalkan konsentrasi bioetanol yang dihasilkan dengan penambahan konsentrasi nanopartikel oksida logam sebesar 15 mg/L dan 1 mg/L. Oksida logam nanopartikel dapat meningkatkan produksi bioetanol, dengan demikian, percobaan ini menjadi perkembangan dari penggunaan limbah pome untuk menjadi sumber baru dalam energi baru dan terbarukan.

Kata kunci: Oksida Logam, Nanopartikel, Bioetanol, Fermentasi Anaerob

ABSTRACT

Pome waste can be an alternative energy source for biogas production through anaerobic treatment, the advantage of anaerobic treatment in lower costs. Microorganisms utilize pome waste as substrate and mixed cultures of anaerobic bacteria for bioethanol production at the fermentation stage, adding metal micronutrients or metal oxide nanoparticles. This study aims to observe the impact of nanoparticles on the efficiency of anaerobic fermentation for bioethanol formation. The research design was a laboratory-scale experiment, using a circulating bed reactor batch system. Pretreatment in the form of seeding process and waste characterization. The results showed that the variation of micronutrient addition with FeO and NiO nanoparticles maximised the concentration of bioethanol produced with the addition of metal oxide nanoparticles concentration of 15 mg/L and 1 mg/L. Nanoparticle metal oxides can increase bioethanol production, thus, this experiment is a development of the use of pome waste to become a new source of new and renewable energy.

Keywords: Metal Oxide, Nanoparticles, Bioethanol, Anaerobic Fermentation

1. PENDAHULUAN

Setiap satu ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan sekitar 700-800 liter limbah pome. Suhu dari effluent limbah pome berkisar diantara 70°C-80°C dengan tingkat keasaman (pH) sekitar 4,5-4,9, nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) antara 57.000-60.400 mg/L dan nilai TSS (*Total Suspended Solids*) sebesar 230-5.440 mg/L (Shintawati, Hasanudin, dan Haryanto, 2017). Sumber dari limbah cair kelapa sawit berasal dari air kondensat pada proses sterilisasi, air dari proses klarifikasi air *hydrocyclone* (*claybath*) dan air pencucian pabrik. Setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diolah dalam industri kelapa sawit menghasilkan sekitar 0,2 ton *Crude Palm Oil* (CPO) atau setara dengan efisiensi 20%, sementara 0,6 ton sisanya menjadi limbah cair berupa *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan efisiensi 66%. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan TBS menghasilkan volume limbah cair yang jauh lebih besar dibandingkan produk utama, sehingga penanganan POME menjadi tantangan utama untuk mengurangi dampak lingkungan. POME mengandung bahan organik tinggi dan bersifat asam, sehingga jika dibuang langsung dapat mencemari lingkungan dan menghasilkan gas rumah kaca (GRK) seperti metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan dinitrogen oksida (N₂O) (Ilmannafian, dkk., 2020; Wu dkk., 2017). Metana, yang memiliki potensi pemanasan global tinggi, terbentuk dari penguraian anaerobik POME. Selain itu, pembuangan langsung ke perairan menyebabkan pengendapan, konsumsi oksigen terlarut, kekeruhan, bau menyengat, dan kerusakan ekosistem. Oleh karena itu, pengolahan POME menjadi energi terbarukan, seperti bioetanol atau biogas. Kandungan senyawa kimia dalam pome terdiri dari karbohidrat, protein, nitrogen, lipid, dan mineral-mineral dengan konsentrasi yang tinggi (Garritano, dkk., 2018). Kandungan senyawa inilah yang menyebabkan pome dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif dalam proses produksi biogas pada proses penguraian secara anaerob.

Hampir 85% pengolahan dari limbah cair industri kelapa sawit menggunakan proses anaerob, keuntungan dari pengolahan secara anaerob dari segi biaya lebih murah, serta proses anaerob menghasilkan energi (*energy recovery*) seperti bioetanol (Parakh, dkk., 2023). Bioetanol adalah salah satu produk dari degradasi pome yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk energi alternatif dan terbarukan (Ahmed, dkk., 2015). Bioetanol adalah hasil dari fermentasi biomassa dengan bantuan mikroorganisme (Jayus, Vivin Noorvita, Nurhayati, Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember Jl Kalimantan, dan Tegal Boto Jember, 2016). Menurut Kusuma dkk (2020), Pada proses fermentasi, terutama saat penguraian substrat secara anaerob, maka mikroorganisme akan mengaktifkan aktivitasnya untuk mengubah sifat substrat guna menghasilkan produk yang diinginkan, tetapi ada beberapa faktor yang mempengaruhi, seperti: Kondisi anaerob, substrat/starter, nutrisi (C/N), pH, dan suhu, hal ini akan menentukan produk dan juga jenis dari fermentasi (Prayitno, Rulianah, dan Nurmahdi, 2020). Sedangkan faktor lain yang mempengaruhi proses fermentasi yaitu nutrisi yang menentukan produk fermentasi menjadi mikronutrien seperti fosfor, sulfur, kalsium, besi, natrium, dan magnesium, serta *trace-element* seperti kobalt, mangan, besi, nikel, dan seng. Senyawa-senyawa tersebut akan menjadi ko-faktor enzim (Hudha, dkk., 2022).

Limbah POME dapat diubah menjadi sumber energi yang ramah lingkungan. Kandungan organik berpotensi sebagai substrat pada proses anaerobik untuk produk biogas dan bioetanol sebagai energi baru dan terbarukan (Qurrotun'aini dan Al'afifah, 2022). Penambahan mikronutrien dengan variasi Fe²⁺ 1,5 mg/L, Ni²⁺ 1 mg/L, Mo²⁺ 0,6 mg/L, membentuk produk bioetanol sebesar 191,4 mg/L pada jam ke-24 dengan laju pembentukan bioetanol maksimum sebesar 14,3 mg/L/jam (Anggamulia, Syafila, Handajani, dan Gumilar, 2020). Sedangkan pada penelitian Gumilar (2023), produksi bioetanol akan meningkat

sebesar 589,4 mg/L pada jam ke-48 karena selektivitasnya yang tinggi terutama pada penambahan ion-ion mikronutrien (penambahan 15 mg/L, Fe, 1 mg/L Ni, dan 0,5 mg/L, Mo). Penambahan trace elements akan mengatur arah fermentasi, namun konsentrasi dari mikronutrien atau trace elements harus diatur dan dijaga untuk mencegah terjadinya kondisi toksik efek dari kelebihan konsentrasi (Zheng, dkk., 2015).

Beberapa penelitian terdahulu lebih banyak melihat alternatif untuk mempercepat pengembangan bioetanol dengan penambahan mikronutrien berbentuk senyawa ion-ion logam seperti Fe^{2+} , Ni^{2+} , dan Mo^{2+} seperti pada penelitian (Anggamulia dkk., 2020; Gumilar, 2023). Namun pada kondisi pengoperasian yang optimal kualitas dan jumlah dari bioetanol dalam ditingkatkan jauh lebih tinggi dengan menggunakan katalis bentuk nano di dalam tahapan prosesnya (Bosu, dkk., 2022). Regenerasi dari katalis nanopartikel pada proses fermentasi menggunakan glukosa dapat dicapai dalam beberapa jam dan dapat digunakan kembali lebih dari empat kali lipat tanpa kehilangan aktivitas katalitik. Nanopartikel logam dapat berkolaborasi dengan mikroorganisme penghasil biohidrogen untuk mendorong proses tahapan fermentasi, dan tidak terbatas pada penambahan nano partikel logam tunggal, penggunaan gabungan beberapa nanopartikel logam memiliki efek stimulasi yang lebih efisien dan bermanfaat pada sistem produksi (Wang dkk., 2023).

Nanopartikel mempunyai kemampuan untuk mendorong bakteri fermentasi dan aktivitas enzim dalam proses anaerobik (Wang dkk., 2016). Nanopartikel meningkatkan transfer elektron yang bertindak sebagai kofaktor dan mengkatalis proses laju fermentasi, sehingga mempercepat reaksi hydrogenase yang berpengaruh bagi meningkatkannya produksi dari bioetanol (Brindha, dkk., 2023). Nanopartikel juga dapat meningkatkan efisiensi penyisihan COD, saat digunakan pada substrat air limbah, karena sifat dari ketergantungan dari bakteri fermentative untuk sintesis enzim pengaruh dari nanopartikel dapat meningkatkan mikroba pada proses pengolahan anaerobik, karena ion logam yang dilepaskan oleh nanopartikel bergabung dengan proses metabolisme bakteri (Mishra dkk., 2019). Beberapa jenis oksida logam seperti: Fe, Au, Ag, Cu, Ni, Ti, SiO_2 dan hermatit dapat meningkatkan produksi bioetanol dalam proses fermentasi (Patel, dkk., 2018).

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan logam dalam bentuk ion dapat meningkatkan hasil produksi bioetanol pada proses pengolahan limbah cair industri kelapa sawit (POME). Namun, inovasi dalam penggunaan nanopartikel oksida logam menawarkan potensi yang lebih besar dalam meningkatkan efisiensi dan hasil produksi bioetanol. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh nanopartikel oksida logam, seperti FeO, NiO, dan MoO, dalam proses anaerob untuk optimasi pembentukan bioetanol. Penggunaan nanopartikel diharapkan memberikan manfaat yang lebih signifikan dan memberikan kontribusi baru dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah POME yang tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi bioetanol, tetapi juga keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah menjadi sumber energi terbarukan yang lebih optimal.

2. METODE

2.1 Operasional Reaktor

Penelitian ini menggunakan reaktor *Circulating Bed Reaktor* (CBR) berkapasitas kurang lebih 5 liter. Reaktor memiliki diameter 13,5 cm, tinggi 43 cm yang dilengkapi dengan leher angsa, pompa resirkulasi, *one-way valve*, *sparger*, dan selang berbahan silikon. Logam dicampurkan ke dalam ke dalam reaktor dalam bentuk oksida logam nanopartikel. Kofaktor logam yang digunakan dalam penelitian adalah logam FeO, NiO, MoO dengan konsentrasi masing-masing logam FeO 15 mg/l, NiO 1 mg/l, MoO 0,5 mg/l, hal ini merujuk pada penelitian sebelumnya menggunakan senyawa logam bentuk ion (Gumilar, 2023). Reaktor dioperasikan selama 30

jam pada kondisi ananerob, hal ini dikarekan waktu optimum untuk pembentukan bioetanol berkisar antara 24-72 jam (Ulum, dkk., 2021). Temperatur ruang laboratorium (25-27°C). Pengambilan sampel bersamaan setiap 6 jam dari *sampling port* masing-masing reaktor.



Gambar 1. Circulating Bed Reaktor skala lab pada penelitian ini.

2.2 Biomassa dan Limbah Cair

Mikroorganisme anaerob bersumber dari lumpur kolam pengolahan limbah cair industri minyak kelapa sawit, dimana menurut terdapat jenis-jenis bakteri seperti: *Clostridium* sp., *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Desulfovibrio*, dan *Micrococcus*, yang mampu berperan dalam mengurai limbah organik kompleks untuk menghasilkan asam-asam volatil dan bioetanol (Zafira, Andrio, dan Veronika, 2019). Serta penambahan rumen sapi dengan perbandingan 1:1, sesuai penelitian (Anggamulia dkk., 2020). Dilakukan penambahan trace mineral yang terdiri Pati, Pepton, K_2HPO_4 , $FeCl_2 \cdot 6H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, dan $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ untuk Pemeliharaan mikroorganisme dalam reaktor bervolume 25 L. Dilakukan proses seeding dan akan dihentikan Ketika sudah dicapai nilai VSS yang cukup, yaitu berkisar antara ± 4.000 mg/L (Andrio, 2014).

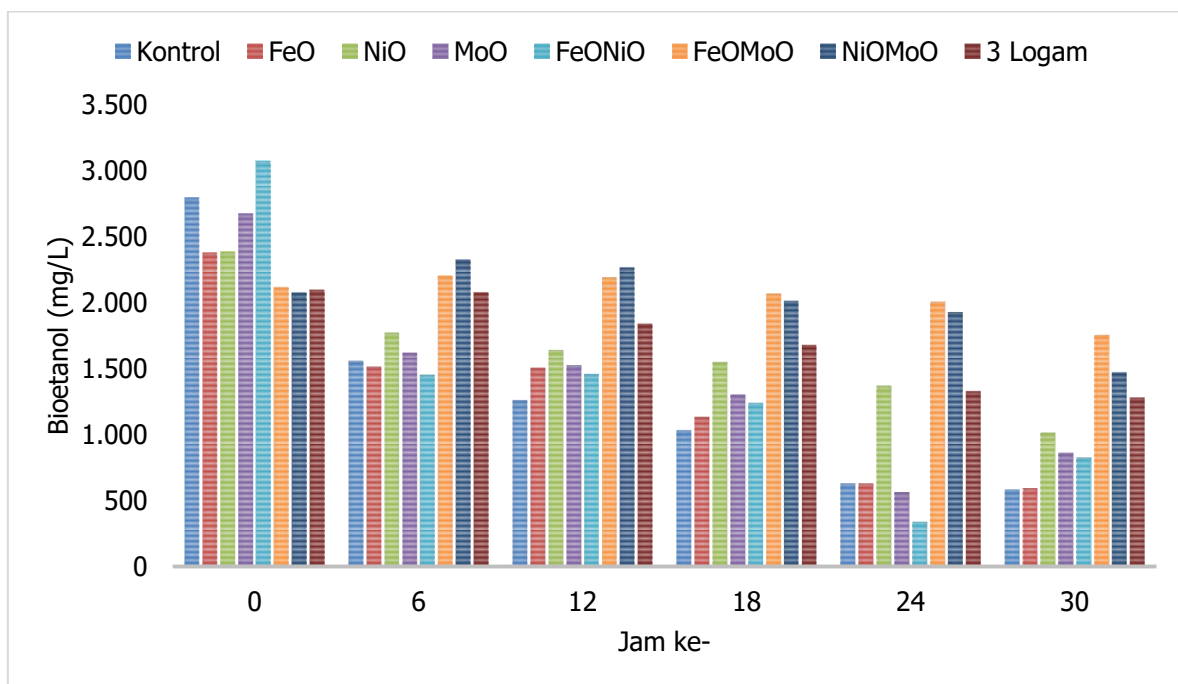
2.3 Parameter Analisis

Parameter pengujian terdiri dari karakteristik awal limbah pome pabrik kelapa sawit seperti: pH, BOD, COD, total solid, *volatile solid*, minyak dan lemak, ammonia, serta total nitrogen. Berdasarkan metode (Ramadhanty, Rohmatullaily, dan Legasari, 2024). Pengujian parameter Total Asam Volatif (TAV), dan bioetanol menggunakan *Gas Chromatography Shimadzu 17-A*, kolom analitik DB-Wax (*propylene glycol*) (30 m x 0,25 mm). Sampel terlebih dahulu dilakukan preparasi dengan campuran 1 mL sampel + 0,5 Aquabides. Selanjutnya sampel difilter menggunakan *nyllon acrodisc syringe* ukuran 0,22 μm milipore dan dimasukkan ke dalam vial berukuran 1,5 mL, dan diinjeksikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

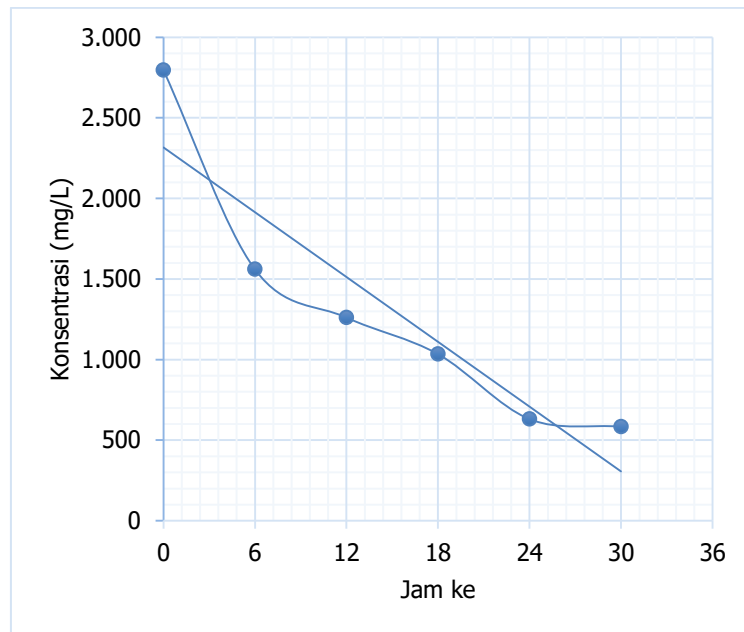
3.1. Pembentukan Bioetanol pada Penambahan Oksida Logam Nanopartikel

Pengoptimalan konsentrasi nanopartikel oksida logam akan meningkatkan aktivitas enzim secara signifikan hal ini akan meningkatkan produk. Tentu hal ini dapat kita lihat dari hasil reaktor kontrol atau tanpa penambahan oksida logam nanopartikel, konsentrasi bioetanol yang dihasilkan akan lebih kecil dan cenderung mengalami penurunan jika dibandingkan dengan reaktor dengan percobaan penambahan oksida logam nanopartikel (Wahid Nuryadin, 2018). Hasil ini dapat diamati pada **Gambar 2**, menunjukkan pembentukan Bioetanol pada reaktor kontrol atau tanpa penambahan nanopartikel oksida logam konsentrasi bioetanol sebesar 2,796 mg/L dengan laju pembentukan bioetanol maksimum, yaitu -2,581 mg/L/jam. *Yield* bioetanol pada variasi ini adalah sebesar -0,17 mg/l etanol per mg/l COD terlarut. Sedangkan dengan dilakukan penambahan nanopartikel oksida logam FeO+MoO dan NiO+MoO dapat meningkatkan *yield* bioetanol sebesar 32,61% pada reaktor dengan penambahan FeO+MoO dari konsentrasi awal 2,115 mg/L naik menjadi 2,203 mg/L, begitupula dengan penambahan NiO+MoO dari konsentrasi awal 2,076 mg/L meningkat menjadi 2,317 mg/L.



Gambar 2. Perbandingan Pembentukan Bioetanol Pada Setiap Variasi Penambahan Mikronutrien Dengan Variasi Tanpa Penambahan Mikronutrien.

Pada proses degradasi limbah cair kelapa sawit (POME) secara anaerobik dalam sistem batch, pembentukan etanol dimulai dengan hidrolisis senyawa organik kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lipid menjadi senyawa sederhana seperti monosakarida, asam amino, dan asam lemak oleh bakteri hidrolitik. Monosakarida ini kemudian difermentasi oleh mikroorganisme fermentatif menjadi senyawa antara seperti piruvat. Melalui jalur fermentasi alkohol, piruvat didekarboksilasi menjadi asetaldehida, yang kemudian direduksi menjadi etanol dengan bantuan enzim alkohol dehidrogenase, menggunakan NADH sebagai donor elektron (Diamant dan Handajani, 2017).



Gambar 3. Profil Pembentukan Bioetanol Pada Proses Pengoperasian Reaktor Tanpa Penambahan Oksida Logam Nanopartikel.

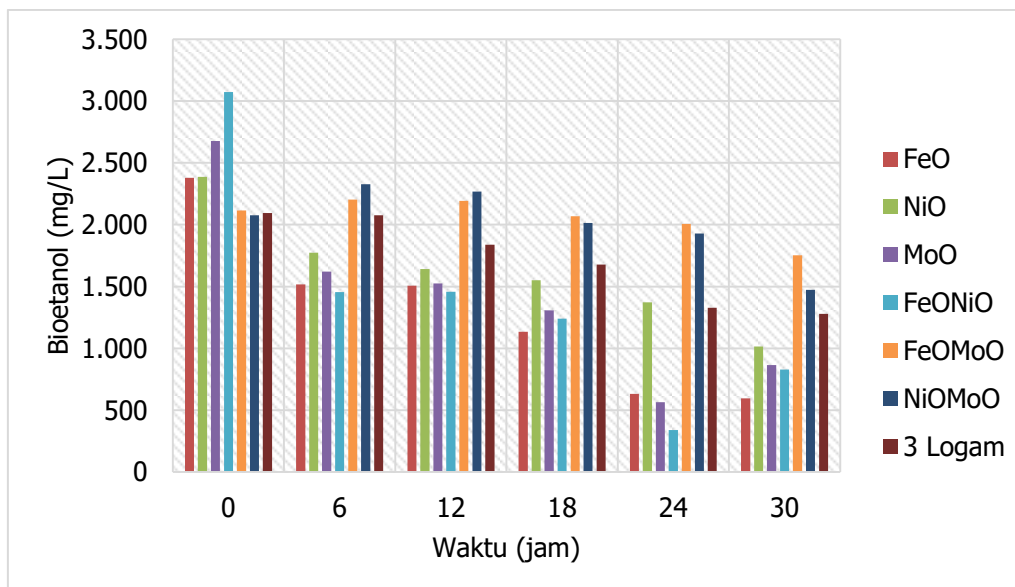
Tingkat bioetanol yang mengalami penurunan hal ini menunjukkan ada kemungkinan aktivitas konsumsi bioetanol alternatif dari oksidasi bioetanol berlebihan yang dilakukan oleh mikroorganisme oksidasi bioetanol, yang tidak bisa melakukan proses perpanjangan rantai (Roghair dkk., 2018). Pada reaktor tanpa penambahan oksida logam nanopartikel (kontrol) konsentrasi asetat yang meningkat menunjukkan asetat mudah diubah menjadi butirat melalui perpanjangan rantai. Untuk mengontrol tingkat asetat dan butirat dilakukan dengan penambahan mikronutrien nanopartikel oksida logam, hal ini akan mempengaruhi beberapa jalur metabolisme asam-asam organik dan asam-asam volatil (Ji dkk., 2022).

Bioetanol menjadi salah satu produk intermediat dalam proses fermentasi atau anaerob tahap asidogenesis (Parakh dkk., 2023). Dalam proses fermentasi kurangnya konstituen anorganik, nutrisi, dan beberapa elemen biogenik yang terbagi menjadi dua kategori (makronutrien dan mikronututrien), dapat membatasi prosesnya (Sukainah dan Fadilah, 2022). Makronutrien seperti karbon, nitrogen, fosfor, dan sulfur diperlukan dalam jumlah besar untuk sintesis komponen seluler dan energi. Mikro-elemen berperan penting dalam metabolisme sel, terutama sebagai kofaktor untuk sejumlah enzim (de Farias Silva dan Bertucco, 2016). Meskipun jumlah elemen yang dibutuhkan sangat kecil (Bardi, Vinardell, Astals, dan Koch, 2023). Proses konversi substrat menjadi bioetanol melibatkan reaksi metabolisme yang kompleks dan banyak, Pembentukan bioetanol dipengaruhi dengan faktor lingkungan, seperti temperatur, pH, oksigen terlarut dan kehadiran modulator enzim. Mikronutrien dapat mempengaruhi konversi piruvat menjadi bioetanol (Rawoof, Kumar, Vo, dan Subramanian, 2021). Pembentukan Bioetanol pada percobaan ini dilakukan secara kombinasi dari mikronutrien oksida logam nanopartikel, FeO, NiO, dan MoO. Variasi konsentrasi dari mikronutrien dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Variasi Konsentrasi Penambahan Mikronutrien Oksida Logam Nanopartikel Pada Tiap-Tiap Reaktor

Reaktor	Konsentrasi (mg/L)			Reaktor	Konsentrasi (mg/L)		
	FeO	NiO	MoO		FeO	NiO	MoO
Reaktor A	-	-	-	Reaktor E	15	1	-
Reaktor B	15	-	-	Reaktor F	15	-	0,5
Reaktor C	-	1	-	Reaktor G	-	1	0,5
Reaktor D	-	-	0,5	Reaktor H	15	1	0,5

Pembentukan Bioetanol dengan penambahan mikronutrien oksida logam nanopartikel pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada **Gambar 4**. Konsentrasi bioetanol maksimum dari masing-masing reaktor, yaitu reaktor A; reaktor B; reaktor C; reaktor D; reaktor E; reaktor F; reaktor G; dan reaktor H, yaitu sebesar 2,796 mg/L; 2,379; 2,387 mg/l; 3,071 mg/L; 2,203 mg/L; 2,327 mg/L; dan 2094 mg/L. Masing-masing konsentrasi bioetanol terbentuk pada jam awal sampai dengan jam ke-6. Dengan laju pembentukan bioetanol maksimum masing-masing sebesar 41,8 mg/L/Jam, dan 14,6 mg/L/Jam. Konsentrasi ini pada percobaan reaktor NiO+MoO (reaktor G) dan reaktor FeO+MoO (reaktor F). Setelah jam ke-18 kemudian keseluruhan reaktor akan mengalami penurunan konsentrasi bioetanol sampai akhir pengoperasian reaktor.



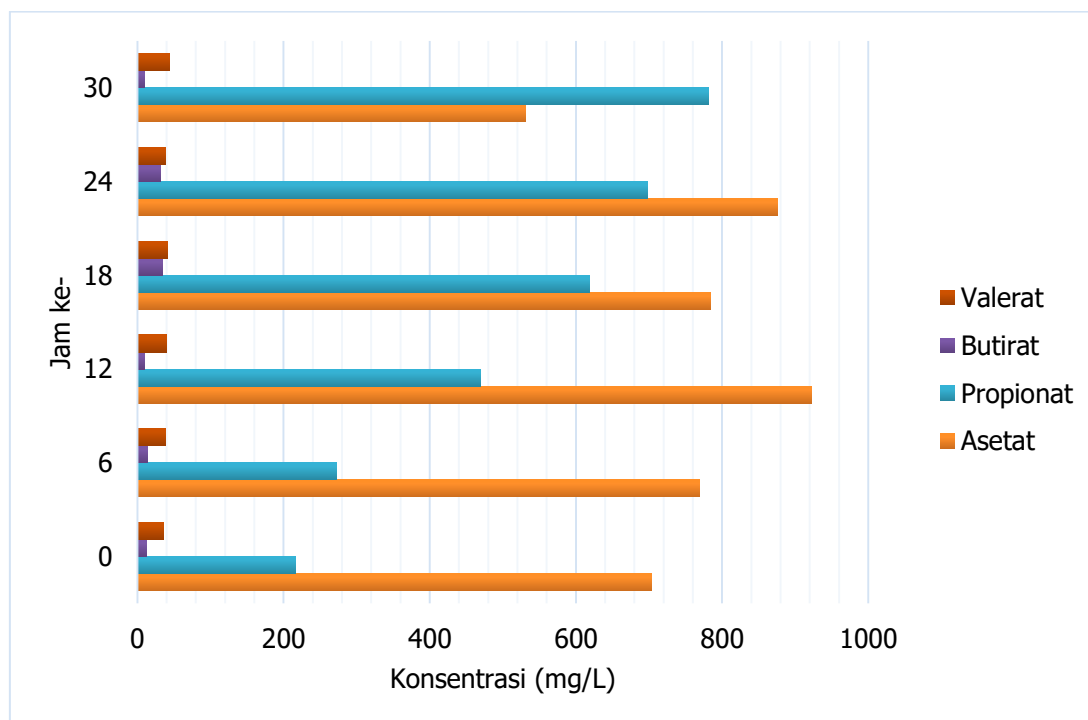
Gambar 4. Profil Pembentukan Bioetanol Pada Proses Pengoperasian Reaktor Dengan Penambahan Mikronutrien Nutrien Oksida Logam Nanopartikel.

Variasi penambahan mikronutrien pada Reaktor F (Fe 15 mg/L, dan NiO 1 mg/L) memberikan hasil konsentrasi bioetanol tertinggi dari seluruh variasi, yaitu sebesar 3,071 mg/L yang terjadi pada jam awal dengan laju pembentukan bioetanol maksimum sebesar 74,9 mg/L/jam. Konsentrasi bioetanol terkecil terdapat pada reaktor H (FeO 15 mg/L, NiO 1 mg/L, MoO 0,5 mg/L) sebesar 2,094 mg/L pada jam ke-30 dengan laju pembentukan maksimum 27,1 mg/L/Jam, dengan adanya variasi ini memodifikasi jalur anaerob secara umum menggeser kearah konversi bioetanol secara optimal (Rachman dkk., 2020). Selain

dari sumber karbon dan nitrogen, ada faktor lain yang mempengaruhi peningkatan yaitu mikronutrien seperti Fe, Mg, Mn dan PO_4^{3-} pada bioproses, senyawa ini memberi efek nutrisi yang dapat mengurangi penggunaan substrat lain (Marcelino dkk., 2020; Martins dan Martins, 2018). Menurut Co, Ni, dan Fe menjadi mikronutrien potensial bagi reaksi VFA untuk proses produksi biogas dan lisis sel, nanopartikel akan menyebabkan penguguran sel pada aktivitas mikroba mikronutrien nanopartikel akan memfasilitasi proses sehingga produk bioetanol yang dihasilkan akan meningkat (Ali dkk., 2024).

3.2 Pengaruh Penambahan Oksida Logam Nanopartikel Terhadap Pembentukan Asam-Asam Volatil.

Total asam volatil (TAV) merupakan tahapan asidogenik, bakteri fermentasi akan mengubah produk hidrolisis seperti monomerik dan dimerik, asam amino menjadi berbagai asam volatil atau VFA), misalnya asetat, propionat, butirrat, dan valerat), pada tahap asetogenik, oksidasi VFA dilakukan oleh berbagai bakteri asetogenik yang termasuk dalam berbagai genus (Louhasakul dkk., 2021). Asam asetat bagian dari asam volatil utama, sehingga pengukuran total asam volatil berkaitan dengan keberadaan asam asetat pada larutan (Santoso, 2019). Senyawa-senyawa asam volatil akan mengalami peningkatan seiring dengan semakin lama proses fermentasi (Palimbong, 2017). Tinggi rendahnya asam dari fermentasi disebabkan adanya faktor pertumbuhan mikroba yang meningkat. Kandungan total asam dengan adanya pengaruh dari aktivitas serta pertumbuhan mikroba yang tinggi dapat menguraikan dan mengoksidasi alkohol menjadi senyawa asam seperti asetat, asam butirrat, asam propionat (Ahmad, Amri, dan Nabilah, 2020). Hal ini dapat diamati pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pembentukan asam-asam volatil pada penambahan mikronutrien oksida logam nanopartikel.

Pembentukan asam-asam volatil umumnya paling banyak terjadi pada tahap asidogenesis. Keseluruhan dari konsentrasi asam-asam volatil (asetat, propionat, butirrat, valerat) terus mengalami peningkatan hingga jam ke-12 dengan konsentrasi, yaitu sebesar 921 mg/L dan 617 mg/L. Untuk konsentrasi asetat, serta kandungan propionat. Asetat menjadi asam volatil

paling dominan, dengan konsentrasi tertinggi sebesar 921 mg/L, ini terbentuk pada jam ke-12. Sedangkan untuk konsentrasi butirat cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan pada proses. Butirat maksimum yang terbentuk adalah sebesar 34,37 mg/L. Konsentrasi valerat juga tidak mengalami peningkatan yang signifikan dengan konsentrasi butirat juga tidak mengalami peningkatan yang signifikan dengan konsentrasi maksimum terjadi pada jam ke-30 dengan konsentrasi sebesar 43,59 mg/L. Keberadaan dari mikronutrien dapat mempengaruhi jalur dari asam-asam volatil karena menjadi kofaktor spesifik bagi enzim tertentu, dan beberapa enzim sangat bergantung pada keberadaan mikronutrien (Sasmita Yusuf dan Nugrahini, 2019). Sedangkan menurut Bevilacqua, Regueira, Mauricio-Iglesias, Lema, dan Carballa (2021), dengan adanya trace elements atau mikronutrien berperan dalam meningkatkan produksi dari VFA, hal ini dapat disebabkan oleh perpanjangan dari proses jalur fermentasi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penambahan variasi oksida logam nanopartikel memberikan pengaruh terhadap efisiensi fermentasi anaerob dalam pembentukan bioetanol. Reaktor F, dengan kombinasi nanopartikel NiO 1 mg/L dan MoO 0,5 mg/L, menghasilkan konsentrasi bioetanol tertinggi, diikuti oleh reaktor E yang menggunakan FeO 15 mg/L dan MoO 0,5 mg/L. Selain itu, selama proses fermentasi, konsentrasi asam-asam volatil (asetat, propionat, butirat, dan valerat) mengalami peningkatan, terutama hingga jam ke-12. Asetat merupakan asam volatil yang paling dominan, dengan konsentrasi tertinggi sebesar 921 mg/L pada jam ke-12, diikuti oleh propionat sebesar 617 mg/L. Konsentrasi butirat cenderung stabil dan tidak menunjukkan perubahan signifikan, dengan nilai maksimum 34,37 mg/L. Hal serupa terjadi pada valerat, yang mencapai konsentrasi maksimum sebesar 43,59 mg/L pada jam ke-30.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Amri, I., & Nabilah, R. (2020). Produksi Bioetanol Generasi Kedua dari Pelepah Kelapa Sawit dengan Variasi Pretreatment H₂SO₄ dan Waktu Fermentasi. *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 1, 12–27.
- Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1260–1278.
- Ali, H. E. A., El-fayoumy, E. A., Soliman, R. M., Elkhatat, A., Al-Meer, S., Elsaid, K., ... Azmuddin Abdullah, M. (2024). Nanoparticle applications in Algal-biorefinery for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114267>
- Andrio, D. (2014). Mekanisme dan strategi control pembentukan Etanol sebagai Usaha Pemanfaatan kembali Limbah Cair yang Mengandung Senyawa Organik Konsentrasi Tinggi (Doctoral thesis). Institut Teknologi Bandung.
- Anggamulia, M. I., Syafila, M., Handajani, M., & Gumilar, A. (2020, Februari 5). The potential bio-conversion of Palm Oil Mill Effluent (POME) as Bioethanol by steady-state anaerobic processes. *E3S Web of Conferences (ETMC and RC EnVe)*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20>
- Bardi, M. J., Vinardell, S., Astals, S., & Koch, K. (2023). Opportunities and challenges of micronutrients supplementation and its bioavailability in anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113689>
- Bevilacqua, R., Regueira, A., Mauricio-Iglesias, M., Lema, J. M., & Carballa, M. (2021). Understanding the effect of trace elements supplementation on volatile fatty acids

- production from proteins. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105934>
- Bosu, S., Pooja, R. P., & Rajasimman, M. (2022). Role of nanomaterials in enhanced ethanol production through biological methods – Review on operating factors and machine learning applications. *Fuel*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123905>
- Brindha, K., Mohanraj, S., Rajaguru, P., & Pugalenti, V. (2023). Simultaneous production of renewable biohydrogen, biobutanol and biopolymer from phytogetic CoNPs-assisted Clostridial fermentation for sustainable energy and environment. *Science of the Total Environment*, 859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160002>
- de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016). Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: A review and technological outlook. *Process Biochemistry*, 51(11), 1833–1842. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.02.016>
- Diamant, E., & Handajani, M. (2017). Optimization and Kinetics Study of Bioethanol Production From Palm Oil Mill Effluent under Anaerobic Process. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 23(1).
- Garritano, A. N., Faber, M. de O., De Sà, L. R. V., & Ferreira-Leitão, V. S. (2018). Palm oil mill effluent (POME) as raw material for biohydrogen and methane production via dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.031>
- Gumilar, A. (2023). Pemanfaatan limbah cair industri minyak sawit sebagai substrat pada pembentukan etanol dan hidrogen secara anaerob. institut teknologi Bandung.
- Hudha, M. I., Nata, R. P., & H.R. Miftachul, Z. (2022). Pembuatan Dekomposer Alami dengan Variasi Perbandingan Limbah Sumber Bakteri dan Waktu Fermentasi. 13, 2022.
- Ilmannafian, A. G., Lestari, E., & Khairunisa, F. (2020). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*). 244–253.
- Jayus, J., Vivin Noorvita, I., Nurhayati, N., Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember Jl Kalimantan, J., & Tegal Boto Jember, K. (2016). PRODUKSI BIOETANOL OLEH *Saccharomyces cerevisiae* FNCC 3210 PADA MEDIA MOLASES DENGAN KECEPATAN AGITASI DAN AERASI YANG BERBEDA. *Jurnal Agroteknologi*, 10(02).
- Ji, X., Zhu, K., Zhang, Y., Ullah, F., Li, A., & Zhang, L. (2022). Mixed culture chain elongation for consumption of acetate and ethanol in anaerobic fermentation: The impact of salt type, dosage and acclimation. *Waste Management*, 152, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.005>
- Kusuma, G. P. A. W., Nocianitri, K. A., & Pratiwi, I. D. P. K. (2020). Pengaruh Lama Fermentasi Terhadap Karakteristik Fermented Rice Drink Sebagai Minuman Probiotik Dengan Isolat *Lactobacillus* sp. F213. *Jurnal Itepa*, 9(2), 182–193.
- Louhasakul, Y., Treu, L., Kougias, P. G., Campanaro, S., Cheirsilp, B., & Angelidaki, I. (2021). Valorization of palm oil mill wastewater for integrated production of microbial oil and biogas in a biorefinery approach. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126606>
- Marcelino, P. R. F., Goncalves, F., Jimenez, itzcoatl M., Carneiro, B. C., Santos, B. B., & Da silva, S. S. (2020). Sustainable production of biosurfactants and their applications. *Lignocellulosic biorefining technologies*, 159–183.
- Martins, P. C., & Martins, V. G. (2018). Biosurfactant production from industrial wastes with potential remove of insoluble paint. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 127, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.11.005>
- Mishra, P., Krishnan, S., Rana, S., Singh, L., Sakinah, M., & Ab Wahid, Z. (2019). Outlook of fermentative hydrogen production techniques: An overview of dark, photo and

- integrated dark-photo fermentative approach to biomass. *Energy Strategy Reviews*, 24, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.001>
- Palimbong, S. (2017). Pengaruh Konsentrasi *Acetobacter Aceti* dan Lama Fermentasi Terhadap Total Asam Cairan Fermentasi Pepaya Burung (*Carica papaya*, L.). *jurnal Sains dan Teknologi Pangan*, 2(2), 478–485.
- Parakh, S. K., Tian, Z., Wong, J. Z. E., & Tong, Y. W. (2023). From Microalgae to Bioenergy: Recent Advances in Biochemical Conversion Processes. *Fermentation*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/fermentation9060529>
- Patel, S. K. S., Lee, J. K., & Kalia, V. C. (2018). Nanoparticles in Biological Hydrogen Production: An Overview. *Indian Journal of Microbiology*, 58(1), 8–18. <https://doi.org/10.1007/s12088-017-0678-9>
- Prayitno, Rulianah, S., & Nurmahdi, H. (2020). Pembuatan Biogas dari Limbah Cair Tahu Menggunakan Bakteri *Indigeneous*. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, (2).
- Qurrotun'aini, Q., & Al'afifah, J. A. (2022). Inovasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit (POME) Net-Zero Emission menjadi Listrik sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan (EBT). *Jurnal Ilmiah Penalaran dan Penelitian Mahasiswa*, 6(2).
- Rachman, S. D., Ainnunnisa, T., Putri, M., Safari, A., Anggraeni, N. I., Fadhlillah, M., & Ishmayana, S. (2020). Pengaruh Suplementasi Ion Logam Besi Terhadap Kinerja Fermentasi dan Toleransi Sel Ragi *Saccharomyces cerevisiae* terhadap Cekaman Lingkungan. *JURNAL MIPA*, 2, 51–59.
- Ramadhanty, O. C., Rohmatullaily, & Legasari, L. (2024). Analisis Kadar Nitrogen Total pada Pupuk Urea Menggunakan Metode Kjeldahl di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 13.
- Rawoof, S. A. A., Kumar, P. S., Vo, D. V. N., & Subramanian, S. (2021). Sequential production of hydrogen and methane by anaerobic digestion of organic wastes: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 1043–1063. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01122-6>
- Roghair, M., Liu, Y., Strik, D. P. B. T. B., Weusthuis, R. A., Bruins, M. E., & Buisman, C. J. N. (2018). Development of an effective chain elongation process from acidified food waste and ethanol into n-Caproate. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00050>
- Santoso, L. R. (2019). Produksi vinegar dari fermentasi kulit Kakao (*theobroma cacao* L.) Menggunakan Sukrosa dan *acetobacter aceti* fnc 0016. UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA SEMARANG, Semarang.
- Sasmita Yusuf, A., & Nugrahini, P. F. (2019). Pengaruh Penambahan NPK dalam Pendegradasian Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Biofiltrasi Anaerob dengan Reaktor Fixed-Bed. *J. Chem. Sci*, 8(3). Diambil dari <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Shintawati, Hasanudin, U., & Haryanto, A. (2017). Karakteristik Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit dalam Bioreaktor Cigar Semi Kontinu. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* Vol, 6(2), 81–88.
- Sukainah, A., & Fadilah, R. (2022). *Toksikologi Bahan Pangan* (1 ed.). Yogyakarta: Badan Penerbit UGM.
- Ulum, K., Purwantiningrum, I., Yustina, R. D., Murdiyatmo, U., & Wardani, A. K. (2021). Studi Komparasi: Produksi Bioetanol Nira Batang Kelapa Sawit oleh Flokulan dan Non-Flokulan *Saccharomyces cerevisiae*. *agriTECH*, 40(4), 322. <https://doi.org/10.22146/agritech.40938>
- Wahid Nuryadin, B. (2018). *Pengantar Fisika Nanomaterial Teori dan Aplikasi*. Bandung: UIN Sunan Gunung Djati Bandung.

- Wang, T., Zhang, D., Dai, L., Chen, Y., & Dai, X. (2016). Effects of metal nanoparticles on methane production from waste-activated sludge and microorganism community shift in anaerobic granular sludge. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep25857>
- Wang, Y., Xiao, G., Wang, S., & Su, H. (2023). Application of nanomaterials in dark or light-assisted fermentation for enhanced biohydrogen production: A mini-review. *Bioresource Technology Reports*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101295>
- Wu, Y., Wang, C., Zheng, M., Zuo, J., Wu, J., Wang, K., & Yang, B. (2017). Effect of pH on ethanol-type acidogenic fermentation of fruit and vegetable waste. *Waste Management*, 60, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.033>
- Zafira, N., Andrio, D., & Veronika, N. (2019). Proses Pengembangbiakan Bakteri Kultur Tercampur untuk Pengolahan Limbah Cair Produksi Minyak Sawit. *JOM FTEKNIK*, 6.
- Zheng, J., Tashiro, Y., Wang, Q., & Sonomoto, K. (2015). Recent advances to improve fermentative butanol production: Genetic engineering and fermentation technology. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.05.023>