

Proses Pembentukan Struvite Kristal Menggunakan Sampah Organik Melalui Proses Anaerobik

Eko Ariyanto^{1,2,3*}, Eci Dwi Septiaranisi¹, Sri Martini^{1,2,3}, Eka Sri Yusmartini^{1,2,3}

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang, Palembang, Jln. A. Yani 13 Ulu, Palembang, Indonesia, 30263

²Program Studi Magister Teknik Kimia, Program Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Palembang, Palembang, Jln. A. Yani 13 Ulu, Palembang, Indonesia, 30263

³Persatuan Insinyur Indonesia Kota Palembang, Indonesia

*Corresponding Author : eko_ariyanto@um-palembang.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan Effective Microorganisms-4 (EM-4) pada proses anaerobik limbah organik terhadap peningkatan konsentrasi ammonium (NH₄) serta mengevaluasi penambahan ion Magnesium (Mg) dan Pospat (PO₄) terhadap penurunan konsentrasi ion NH₄ dalam proses pembentukan struvite. Meskipun telah ada penelitian sebelumnya mengenai pengaruh penambahan ion Mg dan PO₄ dalam pembentukan struvite, namun penelitian yang secara khusus memperhatikan pengaruh penambahan EM-4 masih terbatas. Penelitian ini menggunakan limbah organik, kotoran sapi, dan EM-4 dalam proses anaerobik untuk menghasilkan peningkatan konsentrasi NH₄, yang kemudian digunakan untuk pembentukan struvite dengan penambahan ion Mg dan PO₄, serta dianalisis menggunakan SEM dan EDX. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan EM-4 sebesar 60 ml dalam proses anaerobik limbah organik menghasilkan peningkatan konsentrasi NH₄ yang signifikan dari 97 mg/L hingga 350 mg/L. Pada Proses pembentukan struvite kristal menunjukkan bahwa penambahan ion Mg dan ion PO₄ memiliki efek yang signifikan dalam penurunan konsentrasi NH₄ hingga mencapai 53,6 mg/L dan meningkatkan kemurnian struvite yang dihasilkan yaitu 65%. Analisis Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive X-Ray Analysis EDX memberikan gambaran tentang hasil pembentukan struvite dan keberadaan pengotor dalam struvite. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pemahaman tentang pengaruh penambahan EM-4, ion Mg, dan ion PO₄ dalam pembentukan struvite melalui proses anaerobik limbah organik, serta menekankan pentingnya penelitian lebih lanjut untuk pemahaman yang lebih baik dalam pengolahan limbah organik secara efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: Anaerobik, limbah organik, Effective Microorganisms-4 (EM4), struvite

Abstract

This study aims to evaluate the effect of adding Effective Microorganisms-4 (EM-4) in the anaerobic process of organic waste on the increase in ammonium (NH₄) concentration and to assess the addition of Magnesium (Mg) and Phosphate (PO₄) ions on the reduction of NH₄ ion concentration in the formation process of struvite. Although previous studies have examined the influence of adding Mg and PO₄ ions in struvite formation, research specifically focusing on the impact of EM-4 addition remains limited. This study utilized organic waste, cow manure, and EM-4 in an anaerobic process to increase NH₄ concentration, which was then used for struvite formation with the addition of Mg and PO₄ ions and analysed using Scanning

Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Analysis EDX. The results indicate that the addition of EM-4 at a rate of 60 ml in the anaerobic process of organic waste leads to a significant increase in NH_4 concentration from 97 mg/L to 350 mg/L. During the formation process of struvite crystals, it is observed that the addition of Mg and PO_4 ions significantly reduces NH_4 concentration to 53.6 mg/L and enhances the purity of the produced struvite to 65%. SEM and EDX analysis provide insights into the formation of struvite and the presence of impurities in it. This research contributes to understanding the influence of EM-4 addition, Mg ions, and PO_4 ions in struvite formation through anaerobic organic waste processes, emphasizing the importance of further research for a better understanding of effective and sustainable organic waste treatment.

Keywords : Anaerobic, organic waste, Effective Microorganisms-4 (EM4), struvite

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, limbah organik merupakan masalah lingkungan yang signifikan yang memerlukan penanganan yang efektif dan berkelanjutan (Guilayn et al., 2020; Westerman & Bicudo, 2005). Limbah organik yang dihasilkan dari berbagai sumber, termasuk limbah pertanian, limbah industri, dan limbah domestik, memiliki potensi untuk mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, pengolahan limbah organik menjadi suatu kebutuhan yang mendesak. Limbah organik merupakan sumber daya yang berpotensi tinggi jika dikelola dengan tepat. Dari beberapa penelitian terdahulu yang dapat digunakan untuk memproses penguraian limbah organik yaitu proses anaerobic (Chen et al., 2022; Morales-Polo et al., 2023), pengkomposan (Hija et al., 2021; Kusuma et al., 2017; Liu et al., 2023; Moubareck et al., 2023; Nest, 2021; Sayara et al., 2020; Wei et al., 2021; M. Xu et al., 2023), biogasifikasi (Ardiansyah, 2017; Cachia et al., 2018; Morales-Polo et al., 2023; Prayitno et al., 2020; Priadi et al., 2017; Rukmini, 2016).

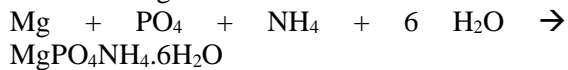
Dalam konteks menghasilkan sumber nitrogen dan fosfor untuk pupuk, proses anaerobik menjadi pilihan yang lebih menguntungkan. Proses ini melibatkan degradasi materi organik oleh mikroorganisme menjadi gula, asam amino, dan asam lemak dalam kondisi tanpa oksigen, serta menghasilkan gas metana (CH_4) dan residu yang mengandung konsentrasi yang tinggi dari nutrisi seperti nitrogen (N) dan fosfor (P) (Walling et al., 2019; H. Xu, 2021).

Dalam proses anaerobik, Effective Microorganisms-4 (EM4) digunakan sebagai inokulum mikroba yang ditambahkan ke dalam

limbah organik dalam proses anaerobic (Raharjo et al., 2021; Shitophyta et al., 2020). Keberadaan EM4 dalam limbah organik bertujuan untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang membantu dalam penguraian bahan organik. Mikroorganisme dalam EM4 bekerja secara sinergis untuk menguraikan bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, termasuk memecah molekul kompleks amonium menjadi bentuk yang lebih mudah tersedia (Liu et al., 2023). Hal ini menghasilkan peningkatan konsentrasi nutrisi amonium (NH_4) dalam limbah organik (Ariyanto et al., 2022). Dari beberapa penelitian tersebut, belum banyak dikaji pengaruh penambahan EM4 terhadap peningkatan konsentrasi amonium (NH_4) dalam proses anaerobik limbah organik. Oleh karena itu, penelitian perlu dilakukan pengamatan lebih lanjut terhadap variasi penambahan EM4 dalam limbah organik pada proses anaerobik. Dengan demikian, diharapkan dapat mengevaluasi efek penambahan EM4 terhadap peningkatan konsentrasi NH_4 dalam limbah organik dan memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai potensi penggunaan EM4 dalam pengolahan limbah organik melalui proses anaerobik.

Tingginya konsentrasi nutrisi tersebut dapat menghasilkan produk yang bernilai tambah seperti struvite (Bolzonella et al., 2006)(Guilayn et al., 2020; Orner et al., 2020). Struvite, juga dikenal sebagai magnesium ammonium fosfat, memiliki potensi sebagai pupuk fosfat yang dapat digunakan dalam pertanian (Katanda et al., 2016; Ryu et al., 2012; Wang et al., 2023;

Weimers et al., 2022). Reaksi pembentukan struvite sebagai berikut:



Pada Reaksi pembentukan struvite dari limbah organik diperlukan penambahan ion Magnesium (Mg) dan fosfat (PO_4) ke dalam larutan limbah anaerobik. Namun, pengaruh variasi dosis dan kondisi reaksi terhadap pembentukan dan karakteristik struvite masih perlu diteliti secara lebih mendalam.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang pengaruh variasi dosis EM4 dan penambahan Magnesium dan PO_4 dalam proses pembentukan struvite dari limbah organik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berguna untuk pengembangan metode pengolahan limbah organik yang berkelanjutan serta pemanfaatan struvite sebagai sumber pupuk fosfat yang ramah lingkungan.

METODE

Dalam penelitian ini, bahan-bahan yang digunakan mencakup limbah organik, kotoran sapi, air, dan EM4 (Effective Microorganisms 4). Limbah organik berasal dari sisa potongan sayur-sayuran yang diperoleh dari Pasar Jakabaring Kota Palembang. Limbah sayur-sayuran tersebut dipotong dengan ukuran 2 cm. Kotoran sapi yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari peternakan sapi Balai Pembibitan Ternak Unggul dan Hijauan Pakan Ternak (BPTU-HPT) di Sembawa Kabupaten Banyu Asin Provinsi Sumatera Selatan. EM4 merupakan kultur mikroba yang kaya akan mikroorganisme yang bermanfaat untuk dekomposisi limbah organik berasal dari *PT. Songgolangit Persada*.

Proses anaerobik dimulai dengan mencampurkan limbah organik, termasuk kotoran sapi, dengan air dalam reaktor anaerobik. Dengan metode yang sama dilakukan oleh Santoso et al., (2023), larutan EM4 kemudian ditambahkan ke dalam reaktor dengan variasi konsentrasi sesuai dengan parameter penelitian. Reaktor anaerobik diisolasi dari udara luar untuk mempertahankan kondisi anaerobik yang optimal. Proses ini berlangsung selama 14 hari, di mana selama periode tersebut konsentrasi NH_4 diamati.

Setelah proses anaerobik selesai, larutan limbah yang dihasilkan dipisahkan dari residu padatan. Larutan limbah tersebut kemudian digunakan untuk proses pembentukan struvite. Magnesium (Mg) dan PO_4 ditambahkan ke dalam larutan limbah dengan variasi tertentu sesuai dengan desain penelitian. Proses pembentukan struvite dilakukan dengan mengaduk larutan limbah yang telah diperkaya dengan Mg dan PO_4 untuk menghasilkan struvite padatan.

Selanjutnya, produk padatan struvite yang dihasilkan dianalisis menggunakan berbagai metode, termasuk Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengamati morfologi dan struktur permukaan struvite, Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) untuk menganalisis komposisi kimia struvite.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Penambahan EM4 pada proses Perementasi Sampah Organik

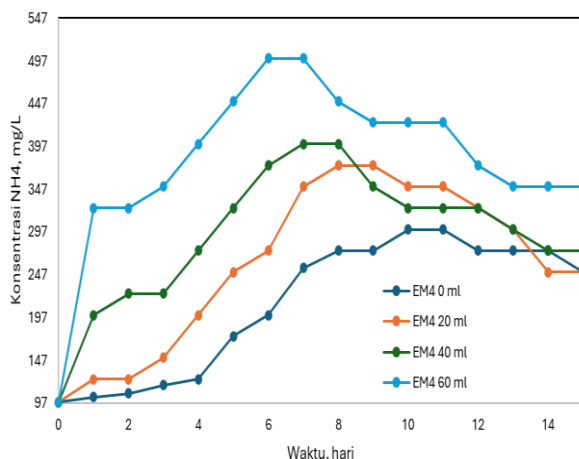
Gambar 1 menunjukkan hasil penelitian yang menginvestigasi pengaruh penambahan Effective Microorganism 4 (EM4) terhadap perubahan pH selama periode 14 hari dalam proses fermentasi limbah organik secara anaerobik. Pada penelitian ini, proses fermentasi menggunakan limbah organik yang terdiri dari sayur-sayuran seberat 1 kg, kotoran sapi seberat 250 gram, dan aquadest sebanyak 13 liter. Variasi penambahan EM4 adalah 0 ml, 20 ml, 40 ml, dan 60 ml.

Gambar 1 menunjukkan hasil penelitian perubahan konsentrasi NH_4 dalam limbah organik selama periode 15 hari, dengan variasi penambahan EM4 sebesar 0 ml, 20 ml, 40 ml, dan 60 ml. Gambar 1 menggambarkan perubahan konsentrasi NH_4 dalam limbah organik selama periode fermentasi dengan variasi penambahan EM4. Dalam semua variasi, konsentrasi NH_4 cenderung meningkat pada tahap awal fermentasi dan kemudian menurun atau tetap stabil pada tahap akhir fermentasi. Variasi penambahan EM4 memiliki pengaruh yang berbeda terhadap perubahan konsentrasi NH_4 , dengan dosis penambahan EM4 yang lebih tinggi cenderung menghasilkan konsentrasi NH_4 yang lebih tinggi pula.

Pada penambahan EM4 sebesar 0 ml, konsentrasi NH_4 awal pada hari ke-0 adalah 98

mg/L. Konsentrasi NH_4 awal pada penelitian ini berasal kotoran sapi yang telah diencerkan dengan 13 liter air. Selama proses fermentasi, konsentrasi NH_4 mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai puncaknya pada hari ke-10 dengan nilai 300 mg/L. Setelah itu, konsentrasi NH_4 tetap stabil pada 275 mg/L hingga akhir periode fermentasi pada hari ke-15.

Pada penambahan EM4 sebesar 20 ml, terjadi peningkatan konsentrasi NH_4 hingga puncaknya pada hari ke-8 dengan nilai 375 mg/L. Setelah hari ke-8, konsentrasi NH_4 turun secara bertahap dan stabil pada 250 mg/L pada hari ke-14 dan ke-15. Dalam penambahan EM4 sebesar 40 ml, konsentrasi NH_4 mengalami peningkatan yang lebih cepat dibandingkan dengan variasi sebelumnya, mencapai puncak pada hari ke-7 dengan nilai 400 mg/L. Setelah hari ke-7, konsentrasi NH_4 menurun dan stabil pada 275 mg/L pada hari ke-14 dan ke-15. Sementara itu, pada penambahan EM4 sebesar 60 ml, konsentrasi NH_4 awal juga adalah 98 mg/L. Terjadi peningkatan konsentrasi NH_4 yang signifikan, mencapai puncaknya pada hari ke-7 dengan nilai 500 mg/L. Setelah itu, konsentrasi NH_4 menurun secara bertahap dan stabil pada 350 mg/L pada hari ke-14 dan ke-15.



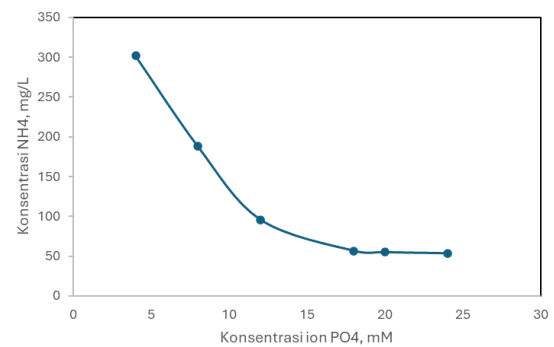
Gambar 1. Produksi NH_4 Berdasarkan Perbandingan Variasi EM4 Terhadap Waktu

Hasil yang sama juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Munawaroh et al., (2013) bahwa penambahan EM-4 dapat meningkatkan konsentrasi NH_4 pada hari ke-10 namun terjadi penurunan konsentrasi NH_4 pada hari ke-20. Penurunan konsentrasi tersebut terjadi sebagai akibat perubahan NH_4 menjadi

NH_3 (Möller & Müller, 2012). Ammonia kemudian berubah menjadi gas seiring dengan peningkatan pH (Krakat et al., 2017).

Pengaruh Variasi PO_4

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa penambahan PO_4 dapat mempengaruhi penurunan konsentrasi ion NH_4 . Dalam penelitian ini, dilakukan penambahan ion PO_4 dalam variasi konsentrasi tertentu (4 mM, 8 mM, 12 mM, 18 mM, 20 mM, dan 24 mM) untuk mengamati penurunan konsentrasi NH_4 dalam larutan limbah.



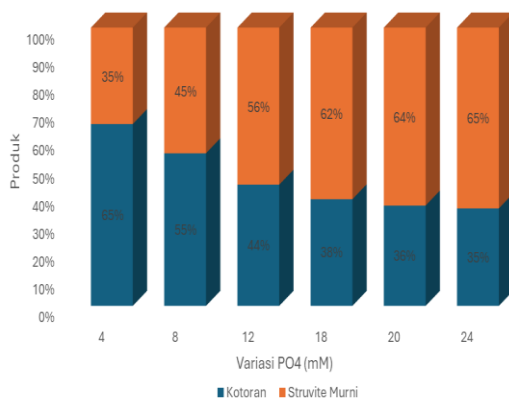
Gambar 2 Pengaruh PO_4 Pada Proses Penurunan Konsentrasi NH_4

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa penurunan konsentrasi NH_4 cenderung menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi ion PO_4 yang ditambahkan. Semakin tinggi konsentrasi ion PO_4 , semakin besar penurunan konsentrasi NH_4 yang terjadi. Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang positif antara penambahan ion PO_4 dan penurunan konsentrasi NH_4 .

Analisis lebih lanjut, penambahan ion PO_4 12 mM memberikan penurunan konsentrasi NH_4 yang signifikan, sedangkan penambahan ion PO_4 18 mM, 20 mM, dan 24 mM tidak menghasilkan penurunan konsentrasi NH_4 yang lebih besar secara signifikan. Oleh karena itu, penambahan ion PO_4 dengan konsentrasi 12 mM adalah kondisi optimum yang efektif dalam mengurangi konsentrasi NH_4 dalam larutan limbah.

Penambahan ion PO_4 dalam konsentrasi yang tinggi, seperti pada kasus penambahan 18 mM, 20 mM, dan 24 mM, tidak menghasilkan penurunan konsentrasi NH_4 yang lebih besar secara signifikan karena telah mencapai titik jenuh atau kelebihan ion PO_4 dalam larutan

limbah. Pada titik ini, penambahan lebih banyak ion PO_4 tidak akan memberikan manfaat tambahan dalam proses penurunan konsentrasi NH_4 . Dalam pembentukan kristal struvite, peningkatan rasio ion PO_4 dapat menyebabkan penurunan konsentrasi NH_4 . Kim et al., (2016) mengamati bahwa dengan meningkatnya pH, kelarutan struvite menurun, mengakibatkan penurunan konsentrasi ion amonium dan peningkatan konsentrasi ion fosfat. Demikian pula, Kabdaşlı et al., (2017) mencatat bahwa peningkatan pH awal menyebabkan konsentrasi ion PO_4 yang lebih tinggi, yang pada gilirannya menurunkan ion NH_4 , sehingga meningkatkan supersaturasi.



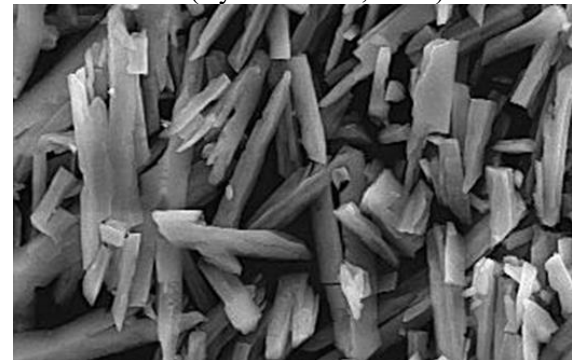
Gambar 3 Penambahan PO_4 Terhadap Kemurnian Produk Padatan

Dari hasil penelitian pada Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan ion PO_4 pada proses pembentukan struvite secara signifikan mempengaruhi kemurnian struvite yang dihasilkan (González-Morales, 2021). Variasi penambahan ion PO_4 pada proses pembentukan struvite dari limbah organik menunjukkan peningkatan kemurnian struvite meningkat dan sementara persentase kotoran dalam produk padatan struvite menurun. Pada penambahan ion PO_4 sebesar 4 mM, kemurnian struvite yang terbentuk sebesar 35%, sementara kotoran masih memiliki persentase yang cukup tinggi yaitu 65%. Namun, dengan penambahan ion PO_4 yang lebih tinggi, yaitu 8 mM, kemurnian struvite meningkat menjadi 45%, dan persentase kotoran dalam sampel menurun menjadi 55%. Kemurnian struvite terjadi peningkatan hingga penambahan ion PO_4 sebanyak 18 mM dan kemudian mencapai kesetabilan dengan konsentrasi PO_4 diatas 18 mM dengan kemurnian struvite berkisar 65%.

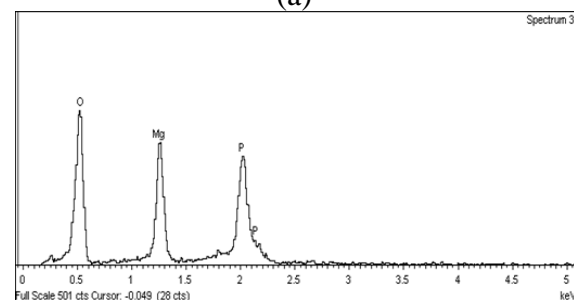
Analisa Produk Struvite Kristal

Berdasarkan analisis produk struvite pada menggunakan SEM (Scanning Electron Microscope) pada padatan struvite dengan pembesaran 2,00 kx (Gambar 4(a)), ditemukan bahwa padatan struvite kristal memiliki bentuk pelet yang tidak beraturan. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur kristal struvite tidak memiliki pola susunan yang teratur.

Penyebab utama dari bentuk pelet yang tidak beraturan pada struvite ini adalah keberadaan ion pengotor yang mempengaruhi pembentukan dan pola susunan kristal (Effendi et al., 2022; Zhang et al., 2015). Ketika terjadi reaksi pembentukan struvite, kehadiran ion pengotor dalam larutan limbah organik, seperti ion logam berat atau zat-zat asing lainnya, dapat terlarut dan terjebak dalam struktur kristal struvite (Bydalek et al., 2018).



(a)



(b)

Gambar 4. Hasil Analisa Padatan Struvite; (a) SEM; dan (b) EDX

Ion pengotor tersebut dapat mengganggu pertumbuhan dan susunan kristal struvite yang ideal, sehingga menghasilkan bentuk pelet yang tidak teratur dan tidak seragam. Ion pengotor ini dapat mengganggu ikatan antara molekul-molekul struvite dan menghambat pembentukan pola susunan kristal yang teratur.

Pada Gambar 4(b) adalah Analisa pada struvite dari limbah organik menggunakan

EDX. Berdasarkan analisis hasil EDX (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) pada padatan struvite, ditemukan bahwa puncak gelombang tinggi terdapat pada ion penyusun utama struvite, yaitu ion Mg (magnesium) dan P (fosfor). Hal ini sesuai dengan komposisi kimia struvite yang umumnya mengandung ion magnesium dan fosfor (Le Corre et al., 2005).

Selain itu, ditemukan juga puncak gelombang tinggi pada ion pengotor, seperti ion K (kalium) dan Ca (kalsium). Keberadaan ion K dan Ca dalam padatan struvite merupakan indikasi adanya kontaminasi atau pengotor dalam proses pembentukan struvite. Ion-ion pengotor ini dapat masuk ke dalam struktur kristal struvite selama proses pembentukan, karena kandungan ion K dan Ca yang mungkin terdapat dalam limbah organik atau dalam bahan baku yang digunakan.

Kehadiran ion K dan Ca sebagai pengotor dapat mengganggu proses pembentukan struvite kristal dengan mengganggu ikatan antara ion Mg dan P. Pengotor tersebut dapat mempengaruhi pertumbuhan dan struktur kristal struvite yang ideal, sehingga mempengaruhi kualitas dan kestabilan produk struvite.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penambahan EM4 pada proses fermentasi limbah organik secara anaerobik menghasilkan perubahan konsentrasi NH_4 yang berbeda-beda tergantung pada dosis penambahan. Dalam semua variasi dosis EM4, terlihat bahwa konsentrasi NH_4 cenderung meningkat pada tahap awal fermentasi dan kemudian menurun atau tetap stabil pada tahap akhir fermentasi. Variasi dosis EM4 yang lebih tinggi cenderung menghasilkan konsentrasi NH_4 yang lebih tinggi pula. Selain itu, penambahan ion PO_4 dalam proses pembentukan struvite dari limbah organik juga mempengaruhi kemurnian produk struvite yang dihasilkan. Penambahan ion PO_4 dengan konsentrasi optimum mampu meningkatkan kemurnian struvite, namun penambahan dengan konsentrasi yang lebih tinggi dari titik optimum tidak memberikan peningkatan kemurnian yang signifikan.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan eksperimen lebih lanjut untuk memperdalam pemahaman tentang

mekanisme pengaruh penambahan EM4 pada proses fermentasi limbah organik secara anaerobik serta penambahan ion PO_4 dalam pembentukan struvite. Selain itu, penting juga untuk melakukan penelitian mengenai potensi penggunaan struvite yang dihasilkan sebagai pupuk atau bahan baku alternatif dalam industri pertanian. Hal ini dapat menjadi langkah konkret dalam mempromosikan konsep ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, A. (2017). Kajian Potensi Limbah Kotoran Manusia Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Di Kota Pontianak. *Jurnal Elkha*, 9(2), 53–60.
- Ariyanto, E., Mayasari, S., & Kharismadewi, D. (2022). Pengaruh Penambahan Effective Microorganisms-4 Sebagai Biocatalyst Terhadap Peningkatan Konsentrasi Ammonium Sebagai Sumber Pupuk. *Jurnal Indobiosains*, 4(1), 28–35.
- Bydalek, F., Kula, A., & Makinia, J. (2018). Morphology and elemental composition of product obtained from struvite fluidized bed reactor. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28(2), 139-149. <https://doi.org/10.2478/ceer-2018-0025>
- Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P., & Cecchi, F. (2006). Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes and phosphorus reclamation in wastewater treatment plants for biological nutrients removal. *Water Science and Technology*, 53(12), 177–186. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.420>
- Cachia, M., Bouyssièrè, B., Carrier, H., Garraud, H., Caumette, G., & Le Hécho, I. (2018). Characterization and Comparison of Trace Metal Compositions in Natural Gas, Biogas, and Biomethane. *Energy and Fuels*, 32(5), 6397–6400. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03915>
- Chen, Y., Ping, Q., Li, D., Dai, X., & Li, Y. (2022). Comprehensive insights into the

- impact of pretreatment on anaerobic digestion of waste active sludge from perspectives of organic matter composition, thermodynamics, and multi-omics. *Water Research*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119240>
- Corre, K. S. L., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. J., & Parsons, S. A. (2005). Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. *Journal of Crystal Growth*, 283(3-4), 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.06.012>
- Effendi, A. J., Baashen, M. S., & Hidayat, S. (2022). Nutrient recovery from organic-rich wastewater through struvite precipitation using air cathode electrocoagulation technology. *Air, Soil and Water Research*, 15, 117862212210879. <https://doi.org/10.1177/11786221221087989>
- Guilayn, F., Rouez, M., Crest, M., Patureau, D., & Jimenez, J. (2020). Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Issue 2, pp. 419–462). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09531-3>
- González-Morales, C., Fernández, B., Molina, F., Naranjo-Fernández, D., Matamoros-Veloza, A., & Camargo-Valero, M. A. (2021). Influence of pH and temperature on struvite purity and recovery from anaerobic digestate. *Sustainability*, 13(19), 10730. <https://doi.org/10.3390/su131910730>
- Hija, M. F., Junus, M., & Kamaliyah, S. N. (2021). Pengaruh Penambahan Effective Microorganism 4 (Em4) Dan Lama Pengomposan Terhadap Kualitas Pupuk Organik Dari Feses Kambing Dan Daun Paitan (*Tithonia Diversifolia*). *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 32(1), 85–94.
- Kusuma, A. P. M., Biyantoro, D., & Margono, M. (2017). Pengaruh Penambahan EM-4 dan Molasses terhadap Proses Composting Campuran Daun Angsana (*Pterocarpus indicum*) dan Akasia (*Acacia auriculiformis*). *Jurnal Rekayasa Proses*, 11(1), 19–23.
- Liu, X., Zubair, M., Kong, L., Shi, Y., Zhou, H., Tong, L., Zhu, R., Lv, Y., & Li, Z. (2023). Shifts in bacterial diversity characteristics during the primary and secondary fermentation stages of bio-compost inoculated with effective microorganisms agent. *Bioresource Technology*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129163>
- Kabdaşlı, I., Atalay, Z., & Tünay, O. (2017). Effect of solution composition on struvite crystallization. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(12), 2921-2928. <https://doi.org/10.1002/jctb.5310>
- Katanda, Y., Zvomuya, F., Flaten, D., & Cicek, N. (2016). Hog-Manure-Recovered Struvite: Effects on Canola and Wheat Biomass Yield and Phosphorus Use Efficiencies. *Soil Science Society of America Journal*, 80(1), 135–146. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.07.0280>
- Kim, D., Min, K. J., Lee, K., Yu, M. S., & Park, K. Y. (2016). Effects of pH, molar ratios and pre-treatment on phosphorus recovery through struvite crystallization from effluent of anaerobically digested swine wastewater. *Environmental Engineering Research*, 22(1), 12-18. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.037>
- Krakat, N., Anjum, R., Dietz, D., & Demirel, B. (2017). Methods of ammonia removal in anaerobic digestion: A review. *Water Science and Technology*, 76(8), 1925–1938. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.406>
- Munawaroh, U., Sutisna, M., & Pharmawati, K. (2013). Penyisihan Parameter Pencemar Lingkungan pada Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Efektif Mikroorganisme 4 (EM4) Serta

- Pemanfaatannya. *Jurnal Institut Teknologi Nasional*, 1(2), 93–104.
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. del M., Revuelta-Aramburu, M., & Hueso-Kortekaas, K. (2023). Anaerobic digestion of organic fraction combinations from food waste, for an optimal dynamic release of biogas, using H₂ as an indicator. *Science of the Total Environment*, 857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159727>
- Moubareck, C. A., Alawlaqi, B., & Alhajeri, S. (2023). Characterization of physicochemical parameters and bacterial diversity of composted organic food wastes in Dubai. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16426>
- Nest, T. Vanden. (2021). Renewable P sources: P use efficiency of digestate, processed animal manure, compost, biochar and struvite. *Science of the Total Environment*, 750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141699>
- Orner, K. D., Camacho-Céspedes, F., Cunningham, J. A., & Mihelcic, J. R. (2020). Assessment of nutrient fluxes and recovery for a small-scale agricultural waste management system. *Journal of Environmental Management*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110626>
- Prayitno, P., Rulianah, S., & Nurmahdi, H. (2020). Pembuatan Biogas Dari Limbah Cair Tahu Menggunakan Bakteri Indigeneous. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 4(2), 90–95. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v4i2.141>
- Priadi, C. R., Rahmatika, I., Fitria, C., Wulandari, D., & Sarwanto Moersidik, S. (2017). Potensi Biogas dan Pupuk dari Limbah Lumpur Kertas. *REAKTOR*, 16(3), 141. <https://doi.org/10.14710/reaktor.16.3.141-146>
- Raharjo, S., Suriyanto, H., & Hidayatullah, S. I. (2021). Biogas production from household food waste using homemade bio-activator in semi-continuous digester. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 802(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012054>
- Rukmini, P. (2016). Produksi Biogas dari Sampah Buah dan Sayur: Pengaruh Volatile Solid dan Limonen. *Konversi*, 5(2), 66–72. <https://doi.org/10.20527/k.v5i2.4769>
- Ryu, H. D., Lim, C. S., Kang, M. K., & Lee, S. I. (2012). Evaluation of struvite obtained from semiconductor wastewater as a fertilizer in cultivating Chinese cabbage. *Journal of Hazardous Materials*, 221–222, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.038>
- Santoso, B., Permatasari, A., Pratama, S., Susmanto, P., & Ningsih, R. (2023). Valorization of waste cooking oil into liquid organic fertilizer by anaerobic fermentation method. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 7(1), 39–47. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v7i1.356>
- Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
- Shitophyta, L. M., Budiarti, G. I., Nugroho, Y. E., & Hanafi, M. (2020). The effect of effective microorganisms-4 (em-4) on biogas yield in solid-state anaerobic digestion of corn stover. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/2/022024>
- Walling, E., Babin, A., & Vaneekhaute, C. (2019). Nutrient and Carbon Recovery

- from Organic Wastes. In *Biorefinery* (pp. 351–373). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5_14
- Wang, L., Ye, C., Gao, B., Wang, X., Li, Y., Ding, K., Li, H., Ren, K., Chen, S., Wang, W., & Ye, X. (2023). Applying struvite as a N-fertilizer to mitigate N₂O emissions in agriculture: Feasibility and mechanism. *Journal of Environmental Management*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117143>
- Wei, Y., Wang, N., Lin, Y., Zhan, Y., Ding, X., Liu, Y., Zhang, A., Ding, G., Xu, T., & Li, J. (2021). Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology- A case study. *Bioresource Technology*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125411>
- Weimers, K., Bergstrand, K. J., Hultberg, M., & Asp, H. (2022). Liquid Anaerobic Digestate as Sole Nutrient Source in Soilless Horticulture—Or Spiked With Mineral Nutrients for Improved Plant Growth. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.770179>
- Xu, H. (2021). Accelerating phosphorus release from waste activated sludge by nitrilotriacetic acid addition during anaerobic fermentation process and struvite recovery. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1066–1076. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.033>
- Xu, M., Sun, H., Chen, E., Yang, M., Wu, C., Sun, X., & Wang, Q. (2023). From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting. In *Environmental Research* (Vol. 229). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115977>
- Zhang, Q., Zhao, S., Ye, X., & Xiao, W. (2015). Effects of organic substances on struvite crystallization and recovery. *Desalination and Water Treatment*, 57(23), 10924-10933.