

Sintesis Dan Karakterisasi Struvite Dari Limbah Ikan Dengan Pelapis Kitosan Sebagai Pupuk Lepas Lambat

Raudhatul Ulfa^{1*}, Kezia Agustina BR Panjaitan¹, Tinasyah Fitri¹, Muhammad Erik Syahputra², Abdul Halid², Firda Tirta Yani¹

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh
Jl. Batam, Bukit Indah, Lhokseumawe 24355.

²Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh
Jl. Cot Tengku Nie, Reuleut, Aceh Utara 24351.

*Corresponding Email: raudhatululfa@unimal.ac.id

Abstrak

Limbah ikan merupakan biomassa organik yang berpotensi mencemari lingkungan, namun kandungan nitrogen dan fosfornya dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi untuk sintesis struvite. Penelitian ini bertujuan mensintesis dan mengarakterisasi struvite dari limbah ikan fermentasi dengan pelapis kitosan sebagai pupuk lepas lambat. Limbah ikan difermentasi secara anaerob menggunakan EM4 dan molase, kemudian filtrat hasil fermentasi direaksikan dengan $MgCl_2$ pada variasi rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ sebesar 1:1:1, 1:1:2, dan 1,2:1:1 pada pH 8–10. Produk struvite yang terbentuk dilapisi kitosan hasil ekstraksi dari limbah kulit udang, kemudian dikarakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Efektivitas pupuk diuji pada tanaman pakcoy berdasarkan tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada pH 9 dengan rasio molar 1,2:1:1, menghasilkan efisiensi penyisihan fosfat sebesar 83,03% dan massa produk 2,40 gram. Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus P–O, Mg–O, serta interaksi gugus fungsional kitosan dengan struvite. Hasil SEM menunjukkan kristal struvite berbentuk prisma ortorombik dengan lapisan amorf setelah proses pelapisan. Uji tanaman menunjukkan bahwa struvite berlapis kitosan mampu melepaskan nutrisi secara bertahap dan mendukung pertumbuhan pakcoy secara stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa struvite-kitosan dari limbah ikan berpotensi dikembangkan sebagai pupuk lepas lambat yang ramah lingkungan.

Kata kunci: kitosan, limbah ikan, pakcoy, pupuk lepas lambat, struvite

Abstract

Fish waste is organic biomass that may cause environmental pollution; however, its nitrogen and phosphorus contents can serve as nutrient sources for struvite synthesis. This study aimed to synthesize and characterize struvite derived from fermented fish waste and coated with chitosan for use as a slow-release fertilizer. Fish waste was anaerobically fermented using EM4 and molasses. The resulting filtrate was reacted with $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ molar ratios of 1:1:1, 1:1:2, and 1.2:1:1 under pH conditions ranging from 8 to 10. The resulting struvite was coated with chitosan extracted from shrimp-shell waste and characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). Fertilizer effectiveness was evaluated on pak choi plants based on plant height, leaf number, and leaf width. The optimum condition was achieved at pH 9 and a molar ratio of 1.2:1:1, yielding 83.03% phosphate-removal efficiency and 2.40 g of product. FTIR spectra confirmed the presence of P–O and Mg–O bonds and interactions between chitosan functional groups and struvite. SEM revealed orthorhombic prismatic struvite crystals with an amorphous coating. Plant tests indicated that chitosan-coated struvite gradually released nutrients and supported stable pak choi growth. These findings demonstrate its potential as an environmentally sustainable slow-release fertilizer.

Keywords: chitosan; fish waste; pak choi; slow-release fertilizer; struvite

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan sumber daya perikanan yang melimpah. Produksi ikan nasional yang mencapai lebih dari enam juta ton per tahun berpotensi menghasilkan volume limbah pengolahan ikan yang tinggi

(BPS, 2024). Limbah ikan, baik padat maupun cair, umumnya masih dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran air dan bau tidak sedap. Padahal, limbah ikan mengandung unsur nitrogen (N) dan fosfor (P)

dalam jumlah yang cukup tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bernilai tambah, terutama dalam bidang kimia dan lingkungan (Febryani dkk., 2023).

Kandungan protein dan senyawa organik dalam limbah ikan dapat diuraikan melalui proses fermentasi menjadi amonium (NH_4^+) dan ortofosfat (PO_4^{3-}), yang merupakan prekursor penting dalam pembentukan senyawa struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Struvite dikenal sebagai kristal fosfat magnesium amonium yang memiliki potensi besar sebagai bahan pupuk slow-release dan media pemulihan unsur hara (nutrient recovery) dari limbah cair maupun padat. Sintesis struvite dari bahan limbah tidak hanya menekan pencemaran, tetapi juga menghasilkan produk kimia bernilai ekonomi tinggi yang ramah lingkungan (Ulfa dkk., 2024).

Proses pembentukan struvite umumnya dipengaruhi oleh pH larutan, rasio molar reaktan, dan waktu presipitasi. Beberapa penelitian melaporkan bahwa efisiensi pemisahan fosfat tertinggi dicapai pada pH 8–9 dengan rasio molar Mg:N:P mendekati 1:1:1 (Li dkk., 2021). Selain itu, limbah organik seperti limbah ikan fermentasi dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan sumber limbah anorganik karena tidak menghasilkan residu toksik (Suartini dkk., 2018). Dengan demikian, limbah ikan fermentasi memiliki potensi besar sebagai sumber nitrogen dan fosfat untuk pembentukan struvite.

Meskipun struvite dikenal sebagai pupuk slow-release, laju pelepasan unsur haranya masih dapat dikendalikan lebih lanjut agar sesuai dengan kebutuhan tanaman pada berbagai kondisi tanah dan lingkungan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pelepasan unsur hara dari pupuk padat dapat dipengaruhi oleh ukuran partikel, morfologi kristal, dan kondisi media (Mangallo dkk., 2022). Untuk meningkatkan stabilitas dan memperpanjang waktu pelepasan nutrisi, modifikasi permukaan menggunakan biopolimer alami seperti kitosan mulai diterapkan. Kitosan, hasil deasetilasi kitin dari limbah kulit udang, dapat membentuk lapisan semipermeabel pada permukaan partikel pupuk, sehingga mengatur difusi ion secara bertahap (Sastra dkk., 2023; Karbeka dkk., 2022). Pendekatan ini memungkinkan pelepasan hara menjadi lebih lambat dan terkendali, sekaligus meningkatkan kestabilan fisik pupuk, sehingga efektif sebagai pupuk *slow-release* yang ramah lingkungan dan sesuai untuk pertanian berkelanjutan.

Penelitian mengenai sintesis struvite dari limbah ikan fermentasi yang dikombinasikan dengan pelapis kitosan masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pemulihan fosfat dari limbah domestik, limbah cair industri, atau penggunaan struvite tanpa modifikasi pelapis. Padahal, limbah ikan memiliki potensi sebagai sumber nitrogen dan fosfat, sementara kitosan dari limbah kulit udang dapat berperan sebagai pelapis alami yang mengendalikan laju pelepasan nutrisi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan limbah ikan fermentasi sebagai bahan baku sintesis struvite dan memodifikasinya dengan kitosan sebagai pupuk lepas lambat. Penelitian ini bertujuan menentukan kondisi optimum pembentukan struvite berdasarkan variasi pH dan rasio molar reaktan, mengevaluasi efisiensi penyisihan fosfat, menganalisis karakteristik produk menggunakan FTIR dan SEM, serta menguji efektivitasnya terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy.

2. METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi wadah fermentasi tertutup yang dilengkapi selang untuk mengeluarkan gas dan mencegah masuknya udara, aluminium foil, neraca analitik, spatula, labu ukur 100 mL, gelas ukur 50 mL, Erlenmeyer 250 mL, hotplate dengan magnetic stirrer, pH meter, kertas saring, corong kaca, botol kaca 100 mL, pipet tetes, dan oven.

Bahan yang digunakan meliputi limbah ikan, limbah kulit udang, EM4, molase atau gula merah sebagai sumber karbon dalam fermentasi limbah ikan, magnesium klorida (MgCl_2), reagen fenol, larutan pengoksidasi berupa campuran alkali sitrat dan natrium hipoklorit, serta natrium nitroprusida untuk analisis amonium. Analisis fosfat menggunakan amonium molibdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dan asam askorbat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$). Selain itu, digunakan asam klorida (HCl), asam asetat (CH_3COOH), akuades, natrium hidroksida (NaOH), serta tanaman pakcoy sebagai objek uji efektivitas pupuk.

2.2 Fermentasi Limbah Ikan secara Anaerob

Limbah ikan dikumpulkan dari pasar tradisional Batuphat, Lhokseumawe, kemudian dicacah dan dimasukkan ke dalam wadah kedap udara. Air ditambahkan hingga seluruh limbah terendam, diikuti penambahan larutan EM4 sebanyak $\pm 5\%$ dari volume total dan molase 1%

sebagai sumber karbon. Proses fermentasi dilakukan secara anaerob selama tujuh hari pada suhu ruang tanpa aerasi. Setelah fermentasi selesai, campuran disaring untuk memisahkan filtrat cair dari residu padat. Filtrat hasil fermentasi ini mengandung senyawa nitrogen (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}) yang digunakan sebagai bahan baku sintesis struvite.

2.3 Analisis Kandungan NH_4^+ dan PO_4^{3-}

Kandungan ion amonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}) dalam filtrat hasil fermentasi dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Analisis NH_4^+ dilakukan dengan metode fenat pada panjang gelombang 632 nm menggunakan reagen fenol, larutan pengoksidasi yang terdiri atas campuran sitrat alkali dan natrium hipoklorit, serta natrium nitroprusida sebagai katalis warna. Analisis PO_4^{3-} dilakukan dengan metode molibdat-askorbat biru pada panjang gelombang 880 nm menggunakan reagen amonium molibdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), dan asam askorbat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$). Hasil pengukuran digunakan untuk menentukan kadar nitrogen dan fosfor terlarut dalam larutan hasil fermentasi.

2.4 Sintesis Struvite

Proses pembentukan struvite dilakukan dengan mereaksikan larutan hasil fermentasi limbah ikan (sebagai sumber ion NH_4^+ dan PO_4^{3-}) dengan larutan magnesium klorida ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebagai sumber ion Mg^{2+} . Variasi rasio molar $\text{Mg}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ (1:1:1, 1:1:2, dan 1,2:1:1) digunakan untuk mengkaji pengaruh komposisi terhadap pembentukan kristal struvite dan kestabilan pH reaksi. Proses presipitasi dilakukan dengan mengatur pH pada rentang basa (8–10) menggunakan NaOH 1 M, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer berkecepatan 250 rpm selama 60 menit. Setelah reaksi selesai, campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman untuk memisahkan endapan kristal struvite dari larutan. Endapan dikeringkan dalam oven pada suhu 50°C untuk menghilangkan sisa kelembapan, sehingga diperoleh kristal struvite murni.

2.5 Ekstraksi dan Produksi Kitosan dari Kulit Udang

Kulit udang dibersihkan, dikeringkan, dan dihaluskan, kemudian diayak menggunakan ayakan 100 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel seragam. Proses deproteinasi dilakukan dengan merendam serbuk kulit udang dalam larutan NaOH 1 M, sedangkan proses

demineralisasi dilakukan menggunakan larutan HCl 1 M dengan perbandingan bahan terhadap larutan 1:10 (g/mL). Kitin hasil proses tersebut kemudian dikonversi menjadi kitosan melalui deasetilasi menggunakan NaOH 50% pada suhu 100°C selama dua jam. Produk kitosan yang diperoleh dikeringkan dan dilarutkan dalam asam asetat 1% (v/v) untuk digunakan sebagai bahan pelapis (*coating agent*) pada struvite.

2.6 Proses Coating Struvite dengan Kitosan

Pelapisan dilakukan dengan mencampurkan serbuk struvite ke dalam larutan kitosan 1% (b/v) yang telah dilarutkan dalam asam asetat. Campuran diaduk hingga homogen dan dibiarkan mengering pada suhu ruang. Produk akhir berupa struvite berlapis kitosan diharapkan memiliki kemampuan pelepasan unsur hara yang lebih lambat (*enhanced slow-release*) dibandingkan dengan struvite murni.

2.7 Uji Karakterisasi Struvite

Karakterisasi dilakukan untuk memastikan pembentukan struvite dan keberhasilan pelapisan kitosan. Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional utama seperti P–O, N–H, dan O–H pada struvite serta interaksi gugus amina ($-\text{NH}_2$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) dari kitosan. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengamati morfologi dan permukaan partikel struvite, baik sebelum maupun sesudah pelapisan, guna mengevaluasi perubahan tekstur, ukuran partikel, dan homogenitas permukaan.

2.8 Uji Efektivitas Pupuk

Efektivitas pupuk diuji menggunakan tanaman pakcoy dengan empat perlakuan berbeda, yaitu: tanpa pupuk (kontrol), pupuk NPK komersial, struvite murni, dan struvite berlapis kitosan. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun yang diukur setiap tiga hari selama sembilan hari masa pertumbuhan. Pengamatan ini digunakan untuk mengevaluasi pelepasan unsur hara secara bertahap serta efektivitas nutrisi yang diserap oleh tanaman dari masing-masing perlakuan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Fermentasi Limbah Ikan

Fermentasi limbah ikan dilakukan untuk memperoleh larutan yang mengandung fosfat dan amonium sebagai sumber utama pembentukan

struvite. Hasil fermentasi limbah ikan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Fermentasi Limbah Ikan

Waktu Fermentasi (Hari)	pH	Bau	Warna	Konsentrasi PO ₄ (mg/L)	Konsentrasi NH ₄ (mg/L)
5	6,5	Asam	Coklat	124,90	12,00
8	7,0	Ringan Khas Fermentasi	Coklat tua	609,90	97,50

Berdasarkan Tabel 1, pH larutan hasil fermentasi mengalami peningkatan dari 6,5 pada hari ke-5 menjadi 7,0 pada hari ke-8. Perubahan ini menunjukkan bahwa proses fermentasi berlangsung menuju kondisi yang lebih netral. Kondisi pH mendekati netral berperan penting dalam mendukung aktivitas mikroorganisme dan enzim fosfatase untuk menguraikan senyawa fosfor organik menjadi fosfat anorganik yang lebih mudah larut.

Konsentrasi fosfat juga meningkat secara signifikan dari 124,90 mg/L menjadi 609,90 mg/L. Peningkatan ini diduga terjadi akibat proses dekomposisi bahan organik limbah ikan, termasuk pelarutan mineral fosfat yang berasal dari tulang ikan. Hasil ini sejalan dengan Rafidah dkk. (2023), yang menyatakan bahwa pH netral merupakan kondisi yang mendukung aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat.

Selain fosfat, konsentrasi amonium juga meningkat dari 12,00 mg/L menjadi 97,50 mg/L. Peningkatan ini menunjukkan adanya proses degradasi protein dan senyawa nitrogen organik selama fermentasi. Namun, konsentrasi amonium yang dihasilkan masih relatif lebih rendah dibandingkan dengan fosfat. Hal ini dapat disebabkan oleh aktivitas mikroba yang belum sepenuhnya optimal atau kemungkinan terjadinya penguapan sebagian amonia akibat perubahan pH selama fermentasi.

3.2 Analisis Spektrofotometri dan Penyisihan Fosfat

Analisis spektrofotometri dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi fosfat sebelum dan sesudah proses presipitasi struvite. Pengujian dilakukan pada berbagai variasi pH dan rasio molar Mg²⁺:NH₄⁺:PO₄³⁻. Hasil analisis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Spektrofotometri

pH	Waktu Reaksi (Menit)	Konsentrasi PO (mg/L)
Rasio Molar Mg ²⁺ : NH ₄ ⁺ : PO ₄ ³⁻ (1:1:1)		
8	0	523,37
	60	140,21
9	0	569,36
	60	106,13
10	0	539,32
	60	129,13
Rasio Molar Mg ²⁺ : NH ₄ ⁺ : PO ₄ ³⁻ (1:1:2)		
8	0	523,55
	60	130,32
9	0	548,71
	60	94,63
10	0	541,75
	60	120,09
Rasio Molar Mg ²⁺ : NH ₄ ⁺ : PO ₄ ³⁻ (1,2:1:1)		
8	0	567,26
	60	135,81
9	0	578,92
	60	98,21
10	0	551,37
	60	100,81

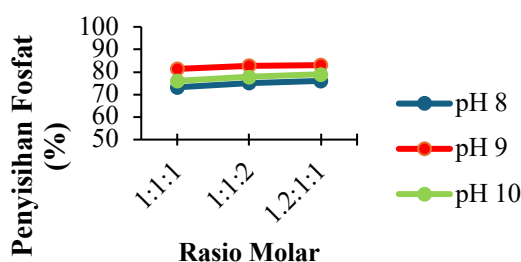
Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat mengalami penurunan setelah proses presipitasi berlangsung selama 60 menit pada seluruh variasi pH dan rasio molar. Penurunan ini mengindikasikan bahwa ion fosfat dalam larutan hasil fermentasi berhasil bereaksi dengan ion magnesium dan amonium membentuk endapan struvite dengan rumus kimia MgNH₄PO₄·6H₂O.

Penurunan konsentrasi fosfat tertinggi diperoleh pada pH 9 dengan rasio molar Mg²⁺:NH₄⁺:PO₄³⁻ sebesar 1,2:1:1. Pada kondisi tersebut, konsentrasi fosfat menurun dari 578,92 mg/L menjadi 98,21 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 83,03%. Hasil ini menunjukkan bahwa pH 9 merupakan kondisi paling sesuai untuk pembentukan struvite karena mampu menciptakan tingkat supersaturasi yang optimal bagi proses nukleasi dan pertumbuhan kristal. Sebaliknya, pada pH 10, efisiensi penyisihan cenderung menurun akibat kemungkinan terbentuknya magnesium hidroksida [Mg(OH)₂] yang bersifat kompetitif terhadap ion fosfat (Korchef dkk., 2023).

3.3 Efisiensi Penyisihan Fosfat

Efisiensi penyisihan fosfat menggambarkan sejauh mana proses presipitasi mampu menghilangkan ion fosfat dari larutan. Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara konsentrasi fosfat awal dan akhir hasil analisis

spektrofotometri. Efisiensi penyisihan fosfat pada berbagai kondisi pH dan rasio molar disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan pH Larutan dan Rasio Molar terhadap Penyisihan Fosfat

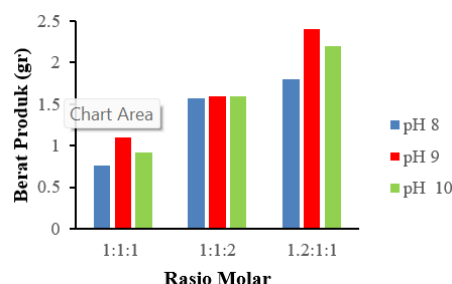
Hasil pada Gambar 1 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan fosfat meningkat secara signifikan seiring peningkatan pH dari 8 hingga 9, kemudian menurun pada pH 10 untuk seluruh variasi rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$. Kondisi optimum tercapai pada pH 9 dengan rasio 1,2: 1: 1, menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 83,03%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pH 9 menyediakan lingkungan ionik yang stabil dan mencapai tingkat supersaturasi yang optimal untuk terbentuknya inti kristal (*nucleation*) dan pertumbuhan kristal struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Setiawan dkk. (2022) yang menyatakan bahwa pH sekitar 9 dan rasio molar tertentu menghasilkan efisiensi pemulihan fosfat maksimum melalui presipitasi struvite. Penurunan efisiensi pada pH 10 disebabkan oleh terbentuknya endapan magnesium hidroksida $[Mg(OH)_2]$ yang bersifat kompetitif terhadap ion fosfat, sehingga mengurangi ketersediaan magnesium bebas untuk reaksi presipitasi, sebagaimana dijelaskan oleh Saru dkk. (2022).

Selain pengaruh pH, variasi rasio molar pereaksi juga berperan kritis dalam efisiensi presipitasi. Rasio magnesium berlebih (1,2:1:1) meningkatkan jumlah ion Mg^{2+} yang tersedia, mempercepat pembentukan inti kristal, dan memperbesar kemungkinan pertumbuhan kristal struvite, sehingga efisiensi presipitasi lebih tinggi dibandingkan dengan rasio (1:1:1). Fenomena ini konsisten dengan mekanisme kinetika presipitasi yang dijelaskan oleh kedua jurnal tersebut, bahwa peningkatan ketersediaan magnesium meningkatkan laju reaksi dan efisiensi endapan fosfat. Secara keseluruhan, kombinasi pH 9 dan rasio molar 1,2:1:1 memberikan kondisi paling efektif untuk optimasi pembentukan struvite dari limbah cair. Hasil ini menegaskan bahwa

pengendalian pH dan rasio pereaksi merupakan faktor determinan dalam meningkatkan efisiensi pemulihan fosfat dan kualitas kristal struvite.

3.4 Jumlah Struvite yang Dihasilkan

Jumlah produk *struvite* yang terbentuk dipengaruhi oleh pH larutan dan rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$. Kedua faktor tersebut menentukan ketersediaan ion aktif, tingkat supersaturasi larutan, serta laju nukleasi dan pertumbuhan kristal. Perbandingan jumlah produk struvite pada setiap perlakuan disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh pH dan Rasio Molar Terhadap Jumlah Produk

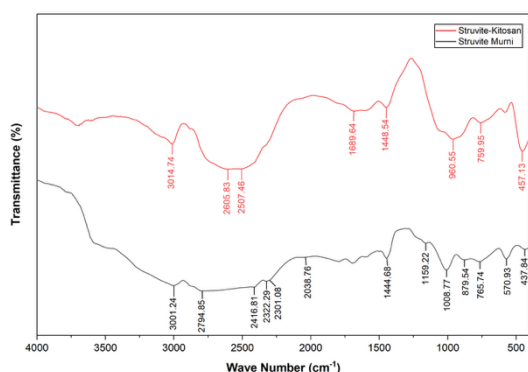
Berdasarkan Gambar 2, jumlah produk struvite menunjukkan pola yang sejalan dengan efisiensi penyisihan fosfat. Massa produk meningkat dari pH 8 ke pH 9, kemudian menurun pada pH 10. Massa struvite tertinggi diperoleh pada pH 9 dengan rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ sebesar 1,2:1:1, yaitu 2,40 gram. Peningkatan jumlah produk pada pH 9 menunjukkan bahwa kondisi tersebut mendukung pembentukan dan pertumbuhan kristal secara optimal. Semakin besar jumlah fosfat yang terendapkan, semakin tinggi pula massa kristal struvite yang dihasilkan. Dengan demikian, terdapat hubungan positif antara efisiensi penyisihan fosfat dan jumlah produk padat yang terbentuk.

Penurunan massa produk pada pH 10 diduga terjadi karena terbentuknya $Mg(OH)_2$, sehingga sebagian ion Mg^{2+} tidak tersedia untuk bereaksi dengan fosfat membentuk *struvite*. Fenomena ini sejalan dengan Setiawan dkk. (2022) dan Saru dkk. (2022), yang menjelaskan bahwa pH optimum berperan penting dalam menjaga kestabilan ion serta mendukung pertumbuhan kristal struvite. Selain itu, rasio molar 1,2:1:1 menghasilkan massa produk lebih tinggi dibandingkan rasio lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan magnesium dalam jumlah sedikit berlebih dapat

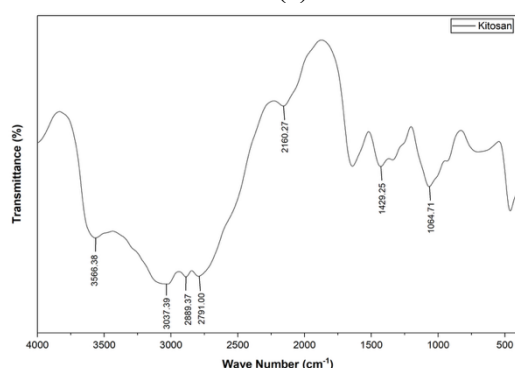
meningkatkan laju nukleasi dan memperbesar peluang pembentukan kristal (Luthfi dkk., 2023).

3.5 Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsional pada struvite, kitosan, dan komposit struvite-kitosan. Analisis ini penting untuk memastikan terbentuknya struktur struvite serta adanya interaksi antara komponen anorganik dan organik setelah proses pelapisan. Hasil Analisa FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.



(a)



(b)

Gambar 3. Hasil Uji FTIR Struvite (a) dan Kitosan (b)

Spektrum FTIR kitosan menunjukkan pita serapan karakteristik pada 3566, 3037, 2889, 1641, 1429, dan 1066 cm^{-1} . Pita-pita tersebut masing-masing menunjukkan keberadaan gugus O–H, N–H, C–H, C=O, C–N, dan C–O–C. Hasil ini sesuai dengan Amri dkk. (2020), yang menyatakan bahwa puncak O–H dan N–H pada kisaran 3400–3200 cm^{-1} serta puncak C=O amida pada sekitar 1650 cm^{-1} merupakan indikator terbentuknya kitosan hasil deasetilasi kitin.

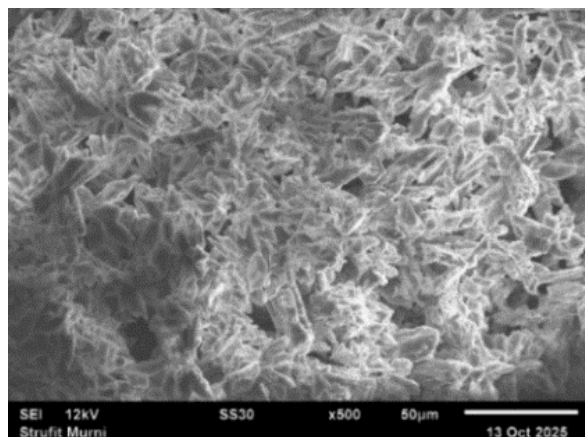
Pada struvite murni, pita serapan terlihat pada 970, 760, dan 450 cm^{-1} , yang masing-masing diatribusikan pada getaran P–O, P–O–Mg, dan Mg–O. Puncak-puncak tersebut merupakan ciri terbentuknya senyawa $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Sementara itu, spektrum struvite-kitosan menunjukkan kombinasi pita organik dan anorganik pada kisaran 3014–457 cm^{-1} . Pita pada 960 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus P–O, sedangkan pita pada 759 dan 457 cm^{-1} menunjukkan ikatan P–O–Mg dan Mg–O. Keberadaan pita O–H dan N–H setelah proses pelapisan menunjukkan bahwa kitosan berhasil berinteraksi dengan permukaan struvite. Gugus amina dan hidroksil pada kitosan diduga membentuk ikatan hidrogen atau interaksi elektrostatis dengan ion pada permukaan kristal, sehingga memperkuat stabilitas komposit.

3.6 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

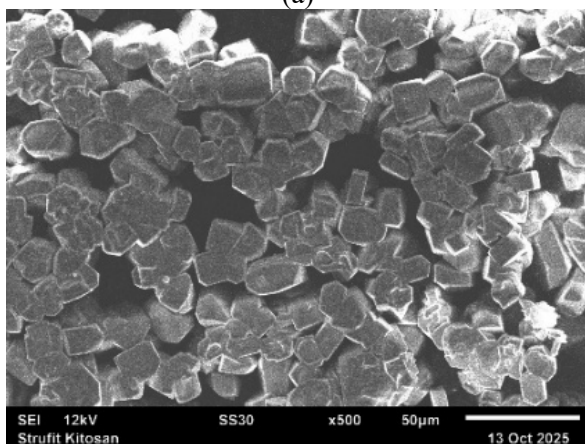
Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengamati morfologi struvite serta perubahan permukaan kristal setelah proses pelapisan menggunakan kitosan. Hasil pengamatan SEM disajikan pada Gambar 4. Hasil SEM menunjukkan bahwa kristal struvite murni memiliki bentuk prisma ortorombik dengan permukaan relatif halus dan tepi kristal yang tegas. Morfologi tersebut merupakan karakteristik umum kristal struvite yang terbentuk pada kondisi basa dengan komposisi ion Mg^{2+} , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} yang seimbang (Shaddel dkk., 2019). Setelah pelapisan dengan kitosan, bentuk dasar kristal masih tetap terlihat, namun permukaannya tampak lebih kasar dan tertutup lapisan amorf. Perubahan ini menunjukkan bahwa kitosan berhasil menempel pada permukaan struvite.

Lapisan kitosan berperan sebagai penghalang fisik yang mengurangi kontak langsung antara kristal struvite dan media sekitarnya. Kondisi ini dapat memperlambat difusi ion Mg^{2+} , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} ke lingkungan. Kitosan sebagai biopolimer memiliki gugus amina dan hidroksil yang dapat membentuk ikatan hidrogen atau interaksi elektrostatis dengan permukaan mineral maupun ion logam, sehingga membentuk lapisan penghambat difusi. Hartatik dkk. (2020) melaporkan bahwa pupuk yang dilapisi kitosan menunjukkan kelarutan nutrisi lebih rendah selama periode inkubasi dibandingkan pupuk tanpa pelapis. Selain itu, Hamzah dkk. (2019) juga menunjukkan bahwa penggunaan lateks-kitosan sebagai binder dapat

menurunkan persentase pelepasan nitrogen dibandingkan dengan formula tanpa kitosan.



(a)



(b)

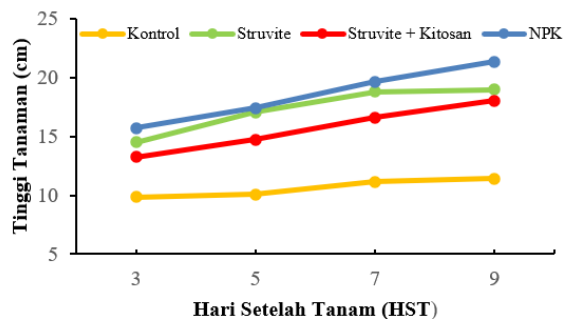
Gambar 4. Struvite Murni (a), Struvite-kitosan (b)

3.7. Uji Efektivitas Pupuk

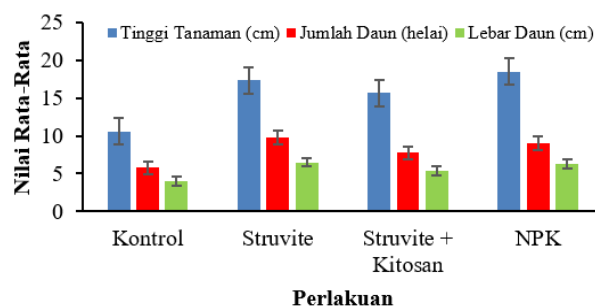
Uji efektivitas pupuk dilakukan pada tanaman pakcoy selama sembilan hari untuk mengevaluasi kemampuan masing-masing perlakuan dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun. Pola pertumbuhan tanaman pada berbagai perlakuan disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 5 dan Gambar 6, perlakuan pupuk memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy. Pada awal pengamatan, perlakuan NPK menunjukkan peningkatan tinggi tanaman paling cepat. Hal ini menunjukkan bahwa unsur hara pada pupuk NPK lebih mudah tersedia dan cepat diserap tanaman. Namun, menjelang akhir pengamatan, laju

pertumbuhan pada perlakuan NPK mulai melambat. Kondisi ini mengindikasikan bahwa nutrisi yang mudah larut cenderung cepat tersedia pada fase awal, tetapi tidak selalu mampu mempertahankan suplai hara secara bertahap.



Gambar 5. Grafik Pola Pertumbuhan Tinggi Tanaman Terhadap Hari Setelah Tanam (HST)



Gambar 6. Grafik Perbandingan rata-rata Pertumbuhan Tanaman pada Berbagai Perlakuan

Sebaliknya, perlakuan struvite dan struvite-kitosan menunjukkan pola pertumbuhan yang lebih lambat pada awal pengamatan, tetapi terus meningkat hingga akhir pengujian. Pola ini menunjukkan adanya pelepasan unsur hara secara bertahap. Lapisan kitosan pada struvite diduga memperlambat difusi ion Mg^{2+} , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} dari matriks struvite ke media tanam, sehingga nutrisi tersedia lebih stabil sesuai kebutuhan tanaman.

Secara kuantitatif, perlakuan NPK menghasilkan tinggi tanaman rata-rata tertinggi sebesar 18,52 cm, diikuti oleh struvite sebesar 17,34 cm dan struvite-kitosan sebesar 15,66 cm. Ketiga perlakuan tersebut menghasilkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan kontrol, yaitu 10,60 cm. Meskipun pertumbuhan awal pada perlakuan struvite-kitosan lebih lambat, pola pertumbuhan yang stabil

menunjukkan bahwa komposit tersebut memiliki karakteristik pupuk lepas lambat. Hasil ini sejalan dengan Yetilmezsoy dkk. (2020), yang menyatakan bahwa struvite memiliki kelarutan rendah dan dapat berperan sebagai sumber fosfor dengan pelepasan lambat.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pH dan rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan fosfat dan pembentukan kristal struvite dari limbah ikan fermentasi. Kondisi optimum diperoleh pada pH 9 dengan rasio molar 1,2:1:1, menghasilkan efisiensi penyisihan fosfat sebesar 83,03% dan massa produk tertinggi sebesar 2,40 gram. Hasil FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsional khas struvite serta adanya interaksi antara struvite dan kitosan. Hasil SEM menunjukkan bahwa pelapisan kitosan membentuk lapisan amorf pada permukaan kristal tanpa menghilangkan morfologi dasar struvite. Uji efektivitas pada tanaman pakcoy menunjukkan bahwa struvite-kitosan mampu menyediakan unsur hara secara bertahap dan mendukung pertumbuhan tanaman secara stabil. Dengan demikian, struvite berlapis kitosan dari limbah ikan berpotensi dikembangkan sebagai pupuk lepas lambat berbasis pemanfaatan limbah organik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, Y., Fajri, R. & Batu, M.S. 2020. Chitosan isolation and its application to reduce the content of metal ions in wellbore water. *Jurnal Neutrino*. 12(1): 30-36.
- Febryani, S.N. 2023. Karakteristik Unsur Hara Pupuk Organik Cair Limbah Viscera Ikan Nila (*Oreochromis Niloticus*) dengan Lama Waktu Fermentasi yang Berbeda. *Skripsi*. Universitas Diponegoro.
- Hamzah, M., Kalemang, E., Fitriani, D.A. dan Astuti, D. 2019. Pembuatan Granul Slow Release Fertilizer Menggunakan Lateks-Kitosan Sebagai Bahan Binder Alami yang Ramah Lingkungan. *Journal of Applied Chemistry*. 7(1): 12-19.
- Hartatik, W., Mardiyati, E., Wibowo, H., Sukarto, A. dan Yusron. 2020. Formulasi dan Pola Kelarutan N Pupuk Urea-Zeolit Lepas Lambat. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 44(1): 61-70.
- Karbeka, M., Mautuka, Z. A. dan Lily, D. O. T. 2022. Sintesis Pupuk Lepas Lambat Berbasis Kitosan-Biochar-Urea Sebagai Material Potensial Pelepasan Nitrogen. *Lantanida Journal*. 12(2): 113-123.
- Korchef, A., Abouda, S., & Souid, I. 2023. Optimizing Struvite Crystallization at High Stirring Rates. *Crystals*. 13(4): 1-12.
- Luthfi, M. Z., Setiadi, T., Nury, D. F. dan Choerudin, C. 2023. Removal of Ammonium and Phosphate from Synthetic Wastewater of Complex Fertilizer Industry Through Struvite Crystallization Process. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. 14(2): 23-32.
- Mangallo, B., Raturoma, R. K. M., & Langsa, M. H. 2022. Komposit Kitosan-Silika Abu Sekam Padi Sebagai Pupuk Lepas Lambat Fe^{2+} dan Mn^{2+} . *Jurnal Natural*. 17(2): 97–103.
- Rafidah, A., Apriliyanti, A., Hidayat, dan Zaenab, Z. (2023). Pemanfaatan Limbah Ikan Sebagai Pupuk Organik Cair (POC) Dengan Penambahan Kulit Buah Nanas dan Air Cucian Beras. *Jurnal Sulolipu*, 23(2), 261–273.
- Saru, S., Arif, M., & Priyanto, D. 2022. Phosphate recovery and crystal growth kinetics of struvite from wastewater. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 12(4): 500–512.
- Sastra, R. A., Adiarto, T., Prasetyo, A. B., Darmokoesoemo, H. dan Putri, D. I. M. 2023. Pemanfaatan Nanokitosan Sebagai Coating Agent dalam Pembuatan Pupuk NPK Berbasis Controlled Release Fertilizer. *Eksergi*. 20(3): 195-199.
- Shaddel, S., Ucar, S., Andreassen, J.P., & Osterhus, S.W. (2019). Engineering of crystals by regulating supersaturation – Correlation with phosphorus recovery, crystal morphology and process efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 378, 1–12.
- Setiawan, A., Firdatul Jannah, F., Ramadani, T. A., dan Dewi, T. U. 2022. Penyisihan Fosfat dan Amonium pada Air Limbah Menggunakan Presipitasi Struvite dengan Penambahan Bittern. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*. 4(1): 21-28.
- Suartini, K., Abram, P.H. & Jura, M.R. (2018). Pembuatan Pupuk Organik Cair Dari Limbah Jeroan Ikan Cakalang (*Katsuwonus Pelamis*). *Jurnal Akademika Kimia*, 7(2), 70–74.

- Ulfa, R., Machdar, I., Yunardi, Y. dan Suhendrayatna. 2024. Influence of Ammonia Concentration on Struvite Production and Ammonia Removal Efficiency in Continuous Flow Crystallizer Reactor. *Journal Of Ecological Engineering*. 25(12): 83-92.
- Yetilmezsoy, K., Sapci-Zengin, Z., & Turan, N. G. (2020). Utilization of struvite recovered from high-strength ammonium-containing simulated wastewater as slow-release fertilizer and fire-retardant barrier. *Environmental Technology*. 41(2): 153–170