

RECOVERY NUTRIEN DARI LANDFILL LEACHATE MELALUI KRISTALISASI STRUVITE MENGGUNAKAN TEKNOLOGI AIR-CATHODE ELECTROCOAGULATION

Syarif Hidayat^{1*}, Narendra Ananta Dwi Putra¹, Agus Jatnika Effendi¹,

¹Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl Ganesha
10 Bandung 40132

*Email : shidayat@itb.ac.id

ABSTRAK

Pada penelitian ini dilakukan recovery nutrisi yang terkandung dalam air lindi dari landfill berupa nitrogen dan fosfor ke dalam bentuk struvite dengan menggunakan teknologi Air-Cathode Electrocoagulation. Variasi debit dilakukan untuk melihat pengaruh dari waktu tinggal terhadap pembentukan struvite yaitu 1-4 mL/menit. Performa reaktor dievaluasi dengan mengukur laju penyisihan nutrisi dan laju pembentukan struvite. Analisis karakteristik presipitat yang terbentuk dilakukan menggunakan metode SEM-EDS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum terjadi pada variasi debit 2 mL/menit dengan laju penyisihan nitrogen sebesar 0,0105/jam, laju penyisihan fosfor sebesar 0,0597/jam, dan laju pembentukan struvite sebesar 0,1564/jam. Berdasarkan hasil SEM-EDS terlihat bahwa morfologi dari presipitat memiliki bentuk kristal berbentuk jarum yang memiliki kemiripan dengan struktur kristal struvite. Komposisi presipitat didominasi oleh unsur Mg, P, dan O. N terdeteksi walaupun dalam jumlah yang sangat kecil. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa debit mempengaruhi pembentukan struvite dalam reaktor. Pada titik tertentu, Semakin tinggi nilai debit yang digunakan menyebabkan waktu detensi yang lebih singkat sehingga mengurangi efisiensi proses penyisihan nutrisi dan pembentukan presipitat.

Kata kunci: electrocoagulation, fosfor, kristalisasi, nitrogen.

ABSTRACT

In this study, the recovery of nutrients contained in landfill leachate in the form of nitrogen and phosphorus into struvite was carried out using Air-Cathode Electrocoagulation technology. Flow rate variations were carried out to observe the effect of residence time on struvite formation. Reactor performance was evaluated by measuring the rate of nutrient removal and the rate of struvite formation. The characteristics of the formed precipitates were analysed using the SEM-EDS method. The results showed that the optimum condition occurred at a flow rate variation of 2 mL/minute with a nitrogen removal rate of 0.0105/hour, a phosphorus removal rate of 0.0597/hour, and a struvite formation rate of 0.1564/hour. Based on the SEM-EDS results, it can be seen that the morphology of the precipitate has a needle-shaped crystal form that has similarities with the struvite crystal structure. The composition of the precipitate is dominated by the elements Mg, P, and O. N was detected, although in very small amounts. Based on these results, it can be concluded that flow rate affects the formation of struvite in the reactor. The higher the discharge value used, the shorter the detention time, thereby reducing the efficiency of the nutrient removal process and precipitate formation.

Keywords: flow rate, electrocoagulation, phosphorus, crystallisation, nitrogen, polarisation, recovery, struvite.

1. PENDAHULUAN

Produksi tanaman agrikultur membutuhkan makronutrien seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang dapat diperoleh melalui pupuk (Huang dkk., 2019). Industri pupuk membutuhkan fosfor dan nitrogen dalam jumlah yang banyak untuk meningkatkan produksi pupuk dalam rangka memenuhi permintaan pangan dunia yang terus meningkat (Cordell dkk., 2009). Fosfor (P) adalah salah satu elemen esensial dalam makhluk hidup dan menjadi bahan yang tidak tergantikan di dalam pupuk agrikultur yang digunakan untuk tanaman pangan (Shu dkk., 2006). Namun, batuan fosfat yang menjadi sumber utama dari fosfor bersifat tidak terbarukan dan terancam akan habis dalam 50-100 tahun ke depan (Cordell dkk., 2009). Hal tersebut akan menyebabkan terancamnya ketahanan pangan dunia.

Struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) adalah senyawa kristal putih yang terdiri dari makronutrien primer (nitrogen dan fosfor) dan makronutrien sekunder (magnesium) yang dapat digunakan sebagai pupuk yang bersifat *slow release* (Shaddel dkk., 2019). Selain *struvite* ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), ada beberapa jenis *struvite* lain yaitu *K-Struvite* ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan *Na-Struvite* ($\text{MgNaPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Chauhan dan Joshi, 2014; Kabdaşlı dkk., 2022). Metode yang sering digunakan dalam melakukan kristalisasi *struvite* yaitu melalui presipitasi kimia dengan cara melakukan pembubuhan senyawa kimia yang mengandung Mg^{2+} seperti MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, dan MgO ke dalam air limbah yang mengandung nutrisi dalam suatu reaktor (Rahman dkk., 2014). Beberapa macam reaktor sudah digunakan dalam melakukan percobaan presipitasi kimia *struvite* yaitu CFR (*Continuous Flow Reactor*), *batch reactor*, dan *anaerobic digester* (Rahman dkk., 2014).

Selain melalui pembubuhan senyawa kimia yang mengandung Mg^{2+} , ada salah satu metode yang digunakan untuk menyuplai ion Mg^{2+} ke dalam air limbah yang diolah, yaitu melalui elektrokoagulasi (Rajaniemi dkk., 2021). Elektrokoagulasi adalah proses elektrokimia yang prosesnya berdasar pada elektroda seperti aluminium, magnesium, dan besi, yang dioksidasi untuk memproduksi ion logam yang dapat digunakan sebagai koagulan sehingga terjadi reaksi dengan nutrisi yang ada pada air limbah (Tian dkk., 2016). Namun, elektrokoagulasi konvensional memiliki kekurangan yaitu biaya operasional yang tinggi karena menggunakan energi listrik sebagai *driving force* dalam pembentukan *struvite* (Effendi dkk., 2022). Oleh karena itu, ada suatu modifikasi teknologi yang masih berkembang dan menggunakan prinsip yang sama dengan elektrokoagulasi yang dinamakan *air-cathode electrocoagulation* (ACEC) (Kim dkk., 2018). ACEC tidak membutuhkan energi eksternal sebagai *driving force* pembentukan *struvite* sehingga diharapkan lebih ekonomis dibandingkan dengan elektrokoagulasi konvensional (Tian dkk., 2016).

Pada penelitian sebelumnya sudah dilakukan *recovery nutrient* melalui kristalisasi *struvite* menggunakan sampel air limbah dari *primary clarifier* (Tian dkk., 2016), air limbah artificial (Effendi dkk., 2022), dan *synthetic hydrolyzed urine* (Liao dkk., 2020) menggunakan ACEC. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini, sampel diambil dari sumber air limbah lain yang memiliki kandungan nutrisi cukup tinggi sehingga memungkinkan terjadi kristalisasi *struvite*. Pada penelitian kali ini, eksperimen dilakukan menggunakan sampel air lindi yang memiliki karakteristik konsentrasi nutrisi yang tinggi (Sall dkk., 2019). Lindi menjadi perhatian karena selain memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, pemanfaatannya belum dilakukan secara optimal. Secara umum tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji pengaruh debit menggunakan sistem *recirculation-batch* terhadap proses kristalisasi *struvite* dan karakteristik presipitat yang dihasilkan pada reaktor ACEC menggunakan sampel limbah air lindi.

2. METODE

2.1 Penelitian Pendahuluan

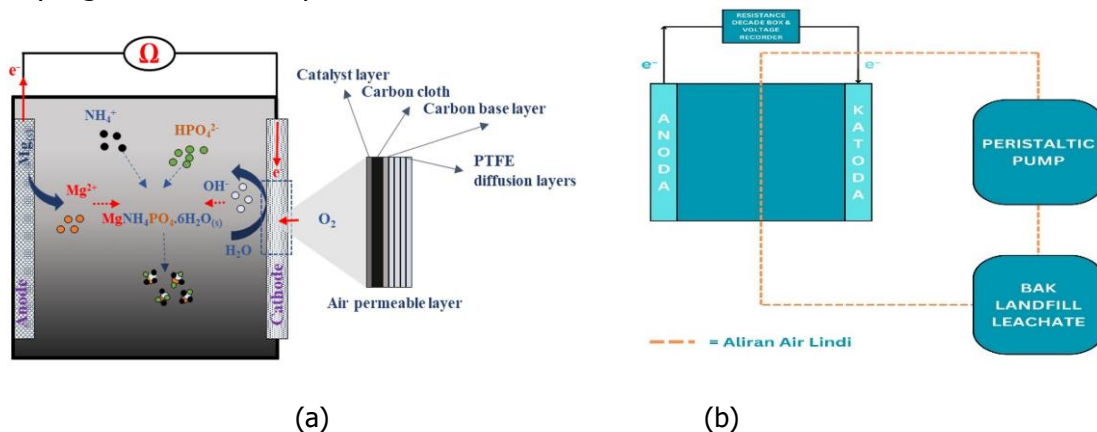
Penelitian pendahuluan yang dilakukan adalah melakukan analisis karakteristik dari air lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sarimukti yang diambil dari bak ekualisasi Instalasi Pengolahan *Leachate* (IPL) TPA Sarimukti. Parameter ini menjadi perhatian karena selain N dan P pembentuk struvite, parameter lain dapat mengganggu pembentukan struvite. Parameter dan metode yang digunakan dalam analisis karakteristik dari air lindi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter dan metode analisis karakteristik air lindi IPL TPA Sarimukti yang digunakan pada penelitian.

No.	Parameter	Metode
1	pH	SNI 06-6989.11-2004
2	Mg	Titration EDTA
3	NH ₄ -N	Spektrofotometri
4	PO ₄ -P	Spektrofotometri
5	K	AAS
6	Fe	AAS
7	Ca	Titration EDTA

2.2 Reaktor Penelitian

Reaktor ACEC yang digunakan pada penelitian ini adalah *single chamber fuel cell* berukuran 5 cm * 5 cm * 3 cm dengan volume kerja 75 ml yang terbuat dari akrilik dan jarak antar plat elektroda adalah 3 cm yang dapat dilihat pada **Gambar 1.a**. Anoda yang digunakan pada penelitian kali ini berbentuk plat magnesium dengan luas permukaan 25 cm² dengan ketebalan 0,3 mm yang terbuat dari alloy AZ31 dengan komposisi Mg 96%, Al 3%, dan Zn 1%. Sedangkan elektroda katoda merupakan carbon cloth (1,071 HCB, AVCarb®). *Carbon cloth* terdiri dari tiga lapisan yaitu (1) lapisan katalis, (2) lapisan pengumpul arus, dan (3) lapisan untuk difusi udara. Pada sisi yang berkontak dengan udara, carbon cloth dimodifikasi dengan empat *polytetrafluoroethylenes* (PTFE) *diffusion layers* untuk mendifusikan O₂ dari udara luar yang kemudian tereduksi menjadi OH. Pada sisi yang berkontak dengan larutan, carbon cloth dimodifikasi dengan katalis platinum yang berfungsi untuk mempercepat reaksi yang terjadi pada reaktor ACEC dengan cara menurunkan energi aktivasi. Kedua elektroda dihubungkan dengan kawat titanium 1 mm. Reaktor juga dihubungkan dengan hambatan eksternal yang berasal dari *resistance decade box* dan *voltage recorder* untuk mengukur voltase yang dihasilkan dari proses reaktor.



Gambar 1. (a) Skema diagram aliran lindi pada reaktor dan (b) reaktor ACEC.

2.2 Operasional Reaktor

Pada tahap ini dilakukan uji coba pengolahan air lindi dengan tujuan melakukan *recovery* nutrisi melalui metode presipitasi kristal *struvite* menggunakan reaktor ACEC. Pada tahap uji coba *running* reaktor, air lindi tidak diberikan perlakuan apapun karena ingin mengetahui bagaimana potensi air lindi dalam menghasilkan kristal *struvite* menggunakan reaktor ACEC. Variabel yang digunakan adalah variasi debit dengan empat variasi yaitu 1 mL/menit, 2 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4 mL/menit. Proses pengolahan lindi akan dilakukan dengan sistem *batch-recirculation* dengan nilai debit resirkulasi diatur menggunakan pompa peristaltik. Reaktor kemudian dioperasikan selama 24 jam (**Gambar 1.b**). Reaktor dihubungkan dengan resistor eksternal $5\ \Omega$ dan *voltage recorder* antara katoda dan anoda untuk mengetahui *voltage* yang dihasilkan sistem selama proses operasi reaktor sehingga dapat ditentukan nilai *current density*. Pengambilan sampel air lindi dilakukan setiap tiga jam. Presipitat yang akan dianalisis berasal dari dalam reaktor yang diambil setelah pengoperasian reaktor selesai untuk setiap variasi debit resirkulasi. Uji polarisasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik reaktor ACEC. Air lindi tidak diberikan perlakuan apapun. Proses pengolahan air lindi akan dilakukan dengan menggunakan sistem *batch-recirculation* dengan nilai debit resirkulasi diatur menggunakan pompa peristaltik. Reaktor kemudian dioperasikan selama 6 jam. Reaktor dihubungkan ke resistor eksternal yang nilainya bervariasi diatur menggunakan *resistance decade box*. *Voltage recorder* dipasang antara katoda dan anoda untuk mengetahui *voltage* yang dihasilkan sistem. Kinetika penyisihan dilakukan dengan membandingkan penyisihan dengan konsentrasi awal dari masing-masing parameter.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Lindi

Pada penelitian pendahuluan dilakukan analisa terhadap karakteristik lindi yang akan digunakan pada penelitian ini. Hasil karakterisasi terhadap lindi dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan karakteristik tersebut, dapat dilihat konsentrasi ortofosfat bervariasi yaitu sebesar 37,25-41,06 mg/L. Konsentrasi amonium juga bervariasi yaitu sebesar 1.606-1.834 mg/L. Hal ini sesuai dengan karakteristik air lindi di berbagai tempat lain yang memang bervariasi (Mojiri dkk., 2021). Ion pengotor seperti K, Fe, dan Ca juga terdapat di dalam air lindi yang akan memengaruhi efektivitas proses pembentukan *struvite* (Effendi dkk., 2025). Air lindi memiliki pH pada rentang 8,55-8,61 sehingga sesuai dengan pH yang dibutuhkan agar *struvite* dapat terbentuk (Trang dkk., 2018).

Tabel 2. Karakteristik lindi yang digunakan pada penelitian.

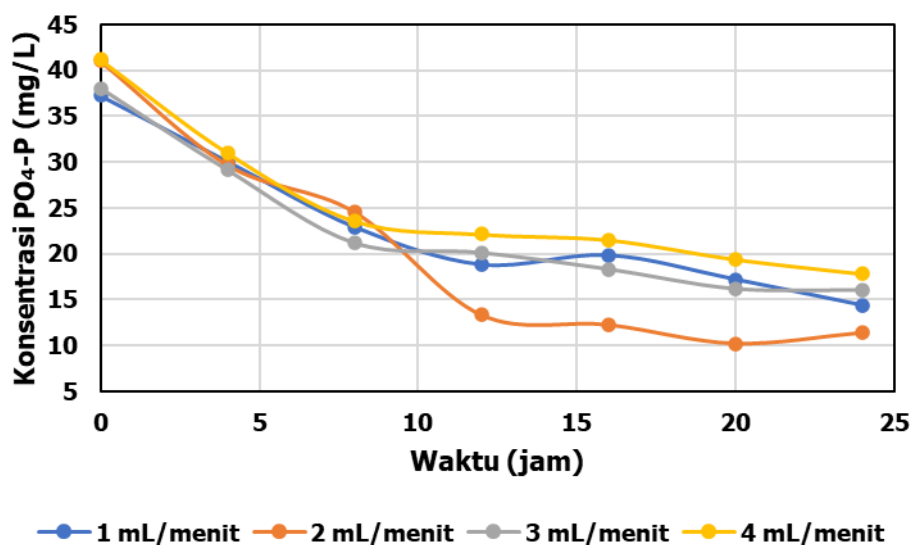
No	Parameter	Nilai	Satuan
1	pH	8,55-8,61	
2	NH ₄ -N	1.606-1.834	mg/L
3	PO ₄ -P	37,25-41,06	mg/L
4	K	1.391	mg/L
5	Fe	4,21	mg/L
6	Ca	25	mg/L
7	Mg	75	mg/L

3.2 Pengaruh Debit terhadap Penyisihan Fosfat

Selama pengoperasian reaktor, ortofosfat di dalam air lindi dengan pH sekitar 8,55-8,61 akan bereaksi dengan berbagai spesi ion seperti Fe³⁺, H⁺, Ca²⁺, NH₄⁺, dan Mg²⁺ menjadi berbagai mineral seperti *hematite*, *magnesioferrite*, dan *struvite* sehingga konsentrasi ortofosfat di dalam air lindi turun. Oleh karena itu, kemungkinan ortofosfat yang bereaksi

tidak semuanya menjadi *struvite*. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Effendi dkk., 2025., keberadaan Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan K^+ dalam air lindi tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan ortofosfat. Dalam proses pengoperasian reaktor, semakin kecil nilai debit maka akan semakin lama waktu detensi sehingga semakin banyak waktu yang tersedia untuk berbagai spesi ion pada air lindi untuk bereaksi dengan akumulasi ion Mg^{2+} yang terkandung di dalam air lindi itu sendiri dan ion Mg^{2+} yang dihasilkan dari proses oksidasi plat anoda Mg. Hal tersebut akan menyebabkan proses penyisihan ortofosfat di dalam air lindi lebih baik.

Gambar 2. menunjukkan profil konsentrasi ortofosfat terhadap waktu pada tiap variasi debit. Dapat dilihat pada grafik ketiga variasi debit profil konsentrasi ortofosfat cenderung turun. Konsentrasi ortofosfat variasi debit 3 mL/menit dan 4 mL/menit cenderung konstan pada jam ke-8 hingga jam ke-24. Sedangkan, pada konsentrasi ortofosfat variasi debit 1 mL/menit dan 2 mL/menit cenderung konstan pada jam ke-12 hingga jam ke-24. Efisiensi penyisihan ortofosfat pada variasi debit 1 mL/menit sebesar 61,3%; 2 mL/menit sebesar 72,3%; dan 3 mL/menit sebesar 57,7%; dan 4 mL/menit sebesar 56,7%. Pada titik tertentu (dari debit 2 mL/menit – 4 mL/menit), hasil ini menunjukkan semakin besar nilai debit yang digunakan maka efisiensi penyisihan ortofosfat akan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh nilai debit yang lebih besar akan menyebabkan waktu detensi yang lebih singkat. Waktu detensi yang lebih singkat akan menyebabkan waktu yang tersedia bagi berbagai spesi ion di dalam air lindi untuk bereaksi satu sama lain semakin berkurang.

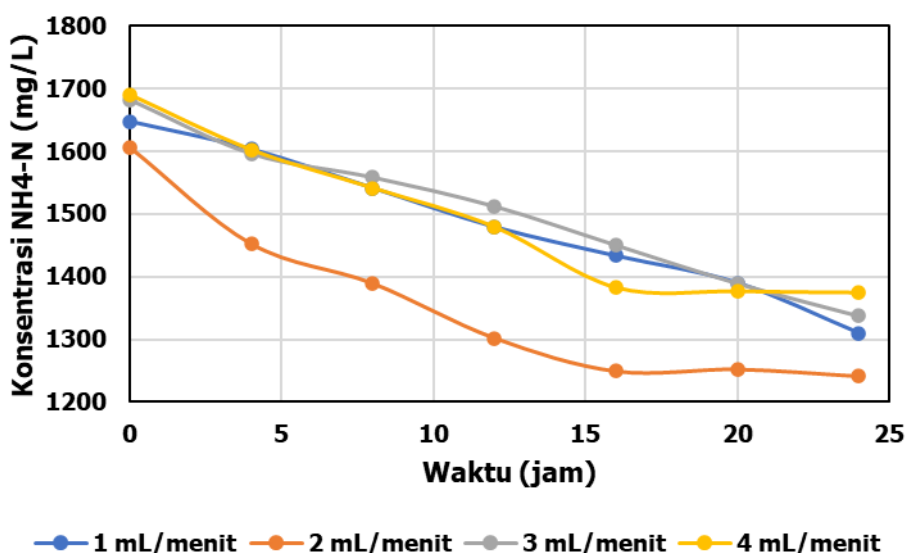


Gambar 2. Profil konsentrasi fosfat terhadap waktu pada tiap variasi debit.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan teknologi ACEC dengan limbah artifisial, maka hasilnya sesuai yaitu persentase penyisihan ortofosfat tertinggi terdapat pada variasi debit 2 mL/menit (Effendi dkk., 2022). Selain itu, jika dibandingkan dengan penelitian yang menggunakan teknologi yang berbeda (elektrokoagulasi konvensional), hasil penelitian ini juga sesuai karena semakin rendah nilai debit yang digunakan maka efisiensi penyisihan ortofosfat semakin tinggi (Bachtiar, 2018). Namun pada variasi debit 1 mL/menit efisiensi penyisihan ortofosfat lebih rendah dibandingkan dengan variasi debit 2 mL/menit. Hal ini bisa disebabkan oleh suplai spesi ion atau nutrien ke dalam reaktor yang lebih sedikit pada variasi debit 1 mL/menit jika dibandingkan dengan debit 2 mL/menit yang mengakibatkan reaksi kimia yang terjadi tidak mencapai kondisi optimum.

3.3 Pengaruh Debit terhadap Penyisihan Nitrogen

Selama pengoperasian reaktor, mekanisme utama penyisihan amonium di dalam air lindi adalah adanya reaksi antara amonium dengan PO_4^{3-} dan Mg^{2+} menjadi *struvite*. Hal ini sesuai dengan simulasi yang dihasilkan dengan menggunakan Visual MINTEQ 4.0 dimana agar reaksi NH_4^+ bisa menjadi NH_3 membutuhkan pH diatas 8. Namun, karena keberadaan Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan K^+ di dalam larutan, amonium berkompetisi dengan ketiga spesi ion tersebut dalam proses pembentukan *struvite* sehingga mengurangi efisiensi penyisihan amonium (Effendi dkk., 2025). Ion Ca^{2+} akan bereaksi dengan PO_4^{3-} membentuk $\text{CaHPO}_4(\text{s})$, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$, dan *portlandite*. Ion Fe^{3+} akan bereaksi dengan PO_4^{3-} membentuk *strengite* dan bereaksi dengan Mg^{2+} membentuk *magnesioferrite*. K^+ akan bereaksi dengan Mg^{2+} dan PO_4^{3-} membentuk *K-Struvite* ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Yesigat dkk., 2022). Oleh karena itu, ketersediaan PO_4^{3-} dan Mg^{2+} untuk bereaksi dengan NH_4^+ untuk membentuk *struvite* yang mampu menurunkan konsentrasi amonium dalam air lindi berkurang karena berkompetisi dengan Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan K^+ . Selama pengoperasian reaktor, semakin kecil nilai debit yang digunakan maka waktu detensi akan semakin besar sehingga semakin banyak waktu yang tersedia bagi amonium pada air lindi untuk bereaksi dengan akumulasi ion Mg^{2+} yang terkandung di dalam air lindi itu sendiri dan ion Mg^{2+} yang luruh dari proses oksidasi plat anoda di Mg, sehingga kemungkinan efisiensi penyisihan amonium melalui mekanisme pembentukan kristal *struvite* akan lebih baik.



Gambar 3. Profil konsentrasi amonium terhadap waktu pada tiap variasi debit.

Gambar 3 menunjukkan profil konsentrasi amonium terhadap waktu. Dapat dilihat pada gambar tersebut profil konsentrasi amonium tiap variasi debit cenderung turun. Konsentrasi amonium pada variasi debit 2 mL/menit dan 4 mL/menit cenderung konstan pada jam ke-16 hingga jam ke-24. Sedangkan, kedua variasi debit lainnya masih mengalami penurunan konsentrasi hingga jam ke-24. Efisiensi penyisihan amonium pada variasi debit 1 mL/menit sebesar 20,4%; 2 mL/menit sebesar 22,7%; 3 mL/menit sebesar 20,5%; dan 4 mL/menit sebesar 18,7%. Secara umum, hasil ini menunjukkan semakin besar nilai debit yang digunakan semakin kecil efisiensi penyisihan amonium, walaupun perbedaannya pada keempat variasi tidak signifikan. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yaitu efisiensi penyisihan amonium lebih rendah jika dibandingkan dengan penyisihan ortofosfat (Effendi dkk., 2022; Effendi dkk., 2025). Hal ini bisa disebabkan oleh keberadaan Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan K^+ di dalam larutan air lindi yang berkompetisi dengan amonium untuk bisa bereaksi dengan

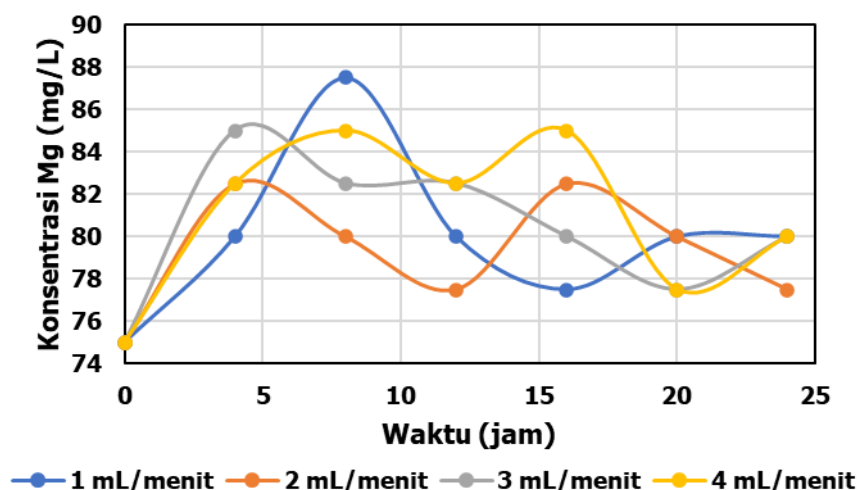
Mg^{2+} dan PO_4^{3-} dalam proses pembentukan *struvite* sehingga mengurangi efisiensi penyisihan amonium.

3.4 Pengaruh Debit terhadap Konsentrasi Magnesium

Peningkatan konsentrasi Mg^{2+} disebabkan oleh aktivitas elektrokimia yang menyebabkan pelepasan ion Mg^{2+} dari plat anoda Mg ke dalam air. Selama pengoperasian reaktor, magnesium di dalam larutan dengan pH sekitar 8,4 akan bereaksi dengan berbagai spesi ion seperti Fe^{3+} , H^+ , NH_4^+ , dan PO_4^{3-} menjadi mineral seperti *magnesioferrite* dan *struvite*. Selain itu, magnesium juga bereaksi membentuk $\text{Mg}(\text{NH}_3)_2^{+2}$, MgOH^+ , dan MgPO_4^- .

Gambar 4 menunjukkan konsentrasi magnesium terhadap waktu pada tiap variasi debit. Dapat dilihat pada grafik konsentrasi magnesium pada tiap variasi debit cenderung berfluktuasi. Variasi debit 1 mL/menit mencapai puncak konsentrasi magnesium paling lama diantara tiga variasi lainnya, yaitu pada jam ke-8, di saat variasi debit 2 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4 mL/menit mencapai puncak konsentrasi magnesium pada jam ke-4. Hal ini dapat disebabkan oleh semakin besar nilai debit yang digunakan maka semakin tinggi kandungan ion elektrolit per satuan waktu di dalam reaktor. Hal ini mengakibatkan peningkatan aktivitas elektrokimia yang memengaruhi peluruhan plat anoda Mg menjadi Mg^{2+} sehingga konsentrasi magnesium yang tinggi dapat dicapai dalam waktu relatif lebih singkat.

Fluktuasi pada konsentrasi magnesium dapat terjadi karena terjadi penambahan ion magnesium melalui peluruhan ion Mg^{2+} ke dalam air yang berasal dari proses oksidasi pada plat anoda Mg dan pengurangan magnesium yang diakibatkan oleh ion magnesium bereaksi dengan berbagai spesi ion membentuk senyawa dan mineral yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya, yaitu konsentrasi magnesium akan berfluktuasi sepanjang proses *recovery* nutrien (Effendi dkk., 2025).



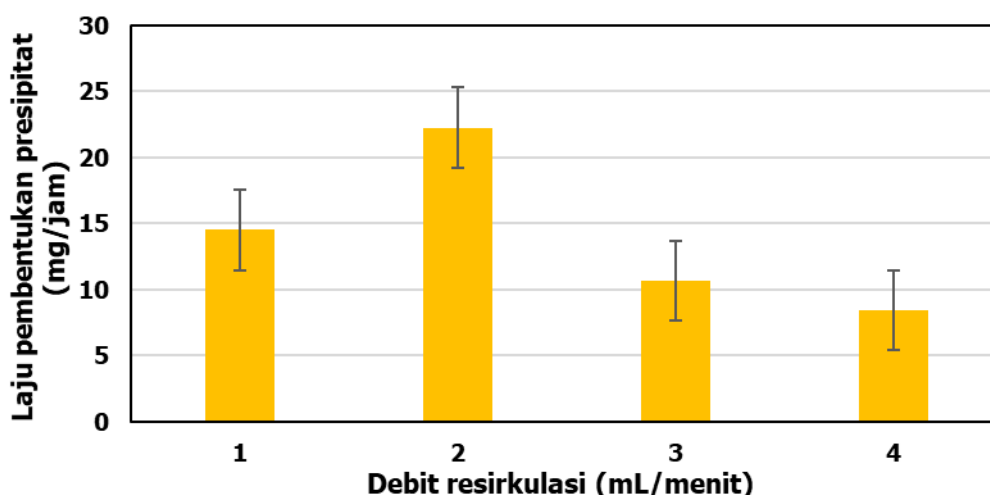
Gambar 4. Profil konsentrasi magnesium terhadap waktu pada tiap variasi debit.

3.4 Pengaruh Debit terhadap Pembentukan Presipitat

Gambar 5 menunjukkan laju pembentukan presipitat yang terjadi pada tiap variasi debit. Dapat dilihat nilai laju pembentukan presipitat dari yang tertinggi hingga terendah secara berurutan yaitu pada variasi debit 2 mL/menit, 1 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4 mL/menit.

Nilai laju pembentukan presipitat pada variasi debit 1 mL/menit adalah 14,5 mg/jam; 2 mL/menit adalah 22,3 mg/jam; 3 mL/menit adalah 10,7 mg/jam; dan 4 mL/menit adalah 8,4 mg/jam. Hal ini disebabkan oleh nilai debit yang lebih besar akan menyebabkan waktu detensi yang lebih singkat. Waktu detensi yang lebih singkat akan menyebabkan waktu yang tersedia bagi berbagai spesi ion di dalam air lindi untuk bereaksi satu sama lain semakin berkurang. Reaksi kimia yang berkurang pada air lindi akan memengaruhi efektivitas pembentukan presipitat. Namun, pada variasi debit 1 mL/menit memiliki nilai laju pembentukan presipitat yang lebih rendah dibandingkan variasi debit 2 mL/menit. Hal ini bisa disebabkan oleh suplai spesi ion atau nutrisi ke dalam reaktor yang lebih sedikit pada variasi debit 1 mL/menit jika dibandingkan dengan debit 2 mL/menit yang mengakibatkan reaksi kimia yang terjadi tidak mencapai kondisi optimum. Reaksi kimia yang tidak mencapai kondisi optimum akan memengaruhi efektivitas pembentukan presipitat. Hasil ini sejalan dengan penyisihan nutrisi di mana efisiensi penyisihan nutrisi tertinggi ke terendah secara berurutan yaitu pada variasi debit 2 mL/menit, 1 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4 mL/menit.

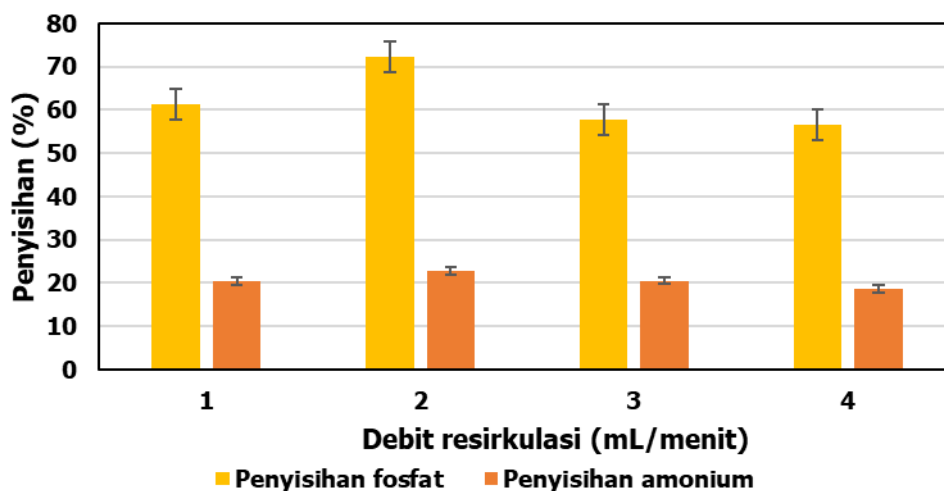
Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya di mana semakin tinggi debit maka laju pembentukan presipitat semakin rendah (Bachtiar dkk., 2018). Nilai laju pembentukan presipitat pada penelitian ini lebih kecil jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya (Effendi dkk., 2025) yang menggunakan teknologi ACEC dan air limbah artifisial yang digunakan terdiri dari amonium yang berasal dari amonium klorida (NH_4Cl), fosfat yang berasal dari kalium fosfat ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), dan logam kompetitor (Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan K^+) yaitu sebesar 139,96 mg/jam. Hal ini bisa disebabkan oleh kandungan materi organik yang memiliki efek negatif terhadap proses kristalisasi *struvite* (baik dari morfologi, ukuran, massa, dan proses presipitasi) (Li dkk., 2019). Namun, setiap jenis materi organik memiliki efek yang berbeda-beda sehingga perlu diteliti lebih lanjut untuk mengetahui efek materi organik terhadap proses kristalisasi *struvite* (Li dkk., 2019).



Gambar 5. Laju pembentukan presipitat pada tiap variasi debit.

3.5 Kinetika Penyisihan Nutrien dan Pembentukan *Struvite*

Gambar 6 menunjukkan data efisiensi penyisihan ortofosfat dan amonium pada setiap variasi debit selama pengoperasian reaktor selama 24 jam. Dapat dilihat pada grafik, urutan variasi debit dengan efisiensi penyisihan nutrisi dari yang tertinggi hingga terendah secara berurutan yaitu 2 mL/menit, 1 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4 mL/menit. Efisiensi penyisihan amonium pada variasi debit 1 mL/menit sebesar 20,4%; 2 mL/menit sebesar 22,7%; 3 mL/menit sebesar 20,5%; dan 4 mL/menit sebesar 18,7%. Efisiensi penyisihan ortofosfat pada variasi debit 1 mL/menit sebesar 61,3%; 2 mL/menit sebesar 72,3%; 3 mL/menit sebesar 57,7%; dan 4 mL/menit sebesar 56,7%.



Gambar 6. Efisiensi penyisihan nutrient (fosfat dan amonium) untuk masing-masing variasi debit.

Jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Effendi dkk., 2025 dan Effendi dkk., 2022), perbedaan efisiensi penyisihan amonium cukup signifikan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Effendi dkk., 2022, air limbah artifisial yang digunakan terdiri dari amonium yang berasal dari amonium klorida (NH_4Cl) dan fosfat yang berasal dari dikalium fosfat ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Oleh karena itu, tidak ada ion pengotor (Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , CO_3^{2-} , Fe^{3+} , dan K^+) yang bisa mengganggu proses *recovery* nutrien karena berkompetisi dengan amonium (Effendi dkk., 2025; Li dkk., 2019). Selain itu, materi organik pada lindi mempengaruhi proses pembentukan struvite baik dari morfologi, ukuran, masa, maupun proses presipitasinya (Li dkk., 2019). Namun, setiap jenis materi organik memiliki efek yang berbeda-beda sehingga perlu diteliti lebih lanjut untuk mengetahui efek materi organik terhadap proses kristalisasi struvite. Penyisihan amonium yang lebih rendah bisa disebabkan oleh tingginya konsentrasi logam kompetitor sehingga mempengaruhi rasio molar logam kompetitor terhadap nutrien yang bisa memengaruhi proses *recovery* nutrien. Pada penelitian ini memiliki konsentrasi Fe sebesar 4 mg/L, Ca:PO₄ adalah 0,68, dan K:N adalah 1,15. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Effendi dkk., 2025 memiliki konsentrasi Fe sebesar 50 mg/L, Ca:PO₄ adalah 1, dan K:N adalah 1,33. Dapat dilihat konsentrasi logam kompetitor pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Effendi dkk., 2025) lebih tinggi dari penelitian ini sehingga memiliki penyisihan nitrogen yang lebih rendah.

Pada penelitian ini laju penyisihan nutrien (kd) dan pembentukan *struvite* (ks) diperoleh dengan menggunakan persamaan kinetika kimia orde 1. Berdasarkan hasil pada Tabel 3 dan Tabel 4, perbedaan nilai debit resirkulasi memberikan pengaruh terhadap kinetika penyisihan nutrien dan pembentukan *struvite*.

Berdasarkan Tabel 3, dapat dilihat bahwa konstanta laju penyisihan ortofosfat dari debit 1 mL/menit sebesar 0,0367/jam; 2 mL/menit sebesar 0,0597/jam; 3 mL/menit sebesar 0,0348/jam; dan 4 mL/menit sebesar 0,0316/jam. Konstanta laju penyisihan amonium dari variasi debit 1 mL/menit sebesar 0,0093/jam; 2 mL/menit sebesar 0,0105/jam; 3 mL/menit sebesar 0,0093/jam; dan 4 mL/menit sebesar 0,0092/jam. Berdasarkan data tersebut, konstanta laju penyisihan ortofosfat tertinggi terdapat pada variasi debit 2 mL/menit. Konstanta laju penyisihan ortofosfat untuk variasi debit 1 mL/menit, 3 mL/menit, dan 4

mL/menit tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Sedangkan, untuk konstanta laju penyisihan amonium pada keempat variasi debit tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan konstanta laju penyisihan amonium tertinggi terdapat pada variasi debit 2 mL/menit. Sehingga berdasarkan pembahasan di atas, perbedaan nilai debit dan kandungan air limbah yang digunakan dalam proses kristalisasi *struvite* menggunakan reaktor ACEC memiliki pengaruh terhadap penyisihan ortofosfat dan amonium.

Tabel 3. Data persamaan linear kinetika orde 1 penyisihan nutrisi pada tiap variasi debit

Nutrien	Debit (mL/menit)	Persamaan Linear	k (/jam)	R ²
Ortofosfat	1	$y = -0,0367x + 3,5251$	0,0367	0,9273
	2	$y = -0,0597x + 3,5958$	0,0597	0,8871
	3	$y = -0,0348x + 3,4935$	0,0348	0,8897
	4	$y = -0,0316x + 3,5684$	0,0316	0,8801
Amonium	1	$y = -0,0093x + 7,4131$	0,0093	0,9919
	2	$y = -0,0105x + 7,3341$	0,0105	0,8761
	3	$y = -0,0093x + 7,424$	0,0093	0,9935
	4	$y = -0,0092x + 7,4157$	0,0092	0,9348

Pada penelitian ini permodelan kinetika pembentukan *struvite* menggunakan kinetika orde 1 (Muryanto dan Bayuseno, 2014), Pada persamaan kinetika reaksi tersebut umumnya menggunakan konsentrasi Mg^{2+} , karena metode yang digunakan untuk kristalisasi *struvite* pada penelitian lain adalah dengan cara melakukan kontak antara ion Mg^{2+} , PO_4^{3-} , dan NH_4^+ yang telah hadir dalam larutan sejak awal reaksi. Sedangkan pada penelitian ini penggunaan konsentrasi Mg^{2+} sebagai acuan tidak representatif karena konsentrasinya yang meningkat seiring waktu yang diakibatkan oleh proses oksidasi pada plat anoda Mg. Sehingga, konsentrasi Mg^{2+} yang terukur dalam larutan merupakan akumulasi konsentrasi Mg^{2+} yang terkandung di dalam air lindi, Mg^{2+} yang terbentuk akibat proses oksidasi plat anoda Mg dan Mg^{2+} yang berkurang akibat bereaksi membentuk senyawa dengan berbagai ion di dalam larutan. Sedangkan jika ortofosfat digunakan sebagai reaktan acuan yang digunakan untuk perhitungan kinetika pembentukan *struvite*, penurunan konsentrasi ortofosfat selama pengoperasian reaktor kecil. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan konsentrasi amonium sebagai acuan kinetika kimia pembentukan *struvite*.

Berdasarkan Tabel 4 didapatkan konstanta laju pembentukan *struvite* dari debit 1 mL/menit sebesar 0,1246/jam; 2 mL/menit sebesar 0,1564/jam; 3 mL/menit sebesar 0,1065/jam; dan 4 mL/menit sebesar 0,0948/jam. Konstanta laju pembentukan *struvite* pada tiap variasi debit sejalan dengan massa presipitat yang terbentuk pada penelitian ini, semakin tinggi konstanta laju pembentukan *struvite* semakin besar massa presipitat yang terbentuk.

Berdasarkan penelitian lain yang menggunakan teknologi selain ACEC, didapatkan konstanta laju pembentukan *struvite* sebesar 9,6/jam (Ariyanto dkk., 2020), sehingga konstanta laju pembentukan *struvite* pada penelitian ini lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh penggunaan teknologi ACEC yang menyebabkan konsentrasi ion Mg^{2+} dalam larutan meningkat sedikit demi sedikit seiring waktu akibat proses reaksi oksidasi pada plat anoda Mg. Sedangkan pada penelitian lain seluruh spesi ion untuk pembentukan *struvite* sudah tersedia dari awal reaksi yang akan memengaruhi proses kristalisasi *struvite*. Walaupun pada air lindi seluruh spesi ion yang dibutuhkan untuk membentuk *struvite* sudah tersedia di awal, namun

konsentrasi ortofosfat minimal yang dibutuhkan untuk melakukan pembentukan struvite secara efektif yaitu 50 mg/L, sedangkan pada penelitian ini menggunakan air lindi yang hanya memiliki konsentrasi ortofosfat sebesar 39 mg/L (Liu dkk., 2013). Apabila dilakukan analisis terhadap rasio molar Mg:P pada air lindi sudah memenuhi minimum rasio molar pada penelitian lain (Rasio Mg:NH:PO adalah 1:1:1) (Liu dkk., 2013; Ueno dan Fuji, 2001; Pastor dkk., 2008).

Berdasarkan penelitian sebelumnya konstanta laju pembentukan *struvite* dengan menggunakan teknologi ACEC adalah sebesar 0,2096/jam (Effendi dkk., 2025), lebih tinggi jika dibandingkan dengan laju pembentukan *struvite* pada penelitian ini. Perbedaan nilai konstanta laju reaksi kemungkinan juga dapat disebabkan oleh perbedaan kecepatan oksidasi plat Mg menjadi Mg^{2+} dan *diffusion rate* oksigen melalui *air-cathode*. Meskipun pembentukan *struvite* dengan teknologi ACEC berlangsung lambat dan jumlah *struvite* yang dihasilkan relatif kecil, namun teknologi ACEC ini tidak menggunakan energi eksternal untuk operasional reaksinya dan juga menghasilkan listrik selama prosesnya. Selain itu, teknologi ACEC juga tidak membutuhkan penambahan bahan kimia, khususnya sebagai suplai Mg^{2+} , sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut.

Tabel 4. Data persamaan linear kinetika orde 1 pembentukan *struvite* tiap variasi debit

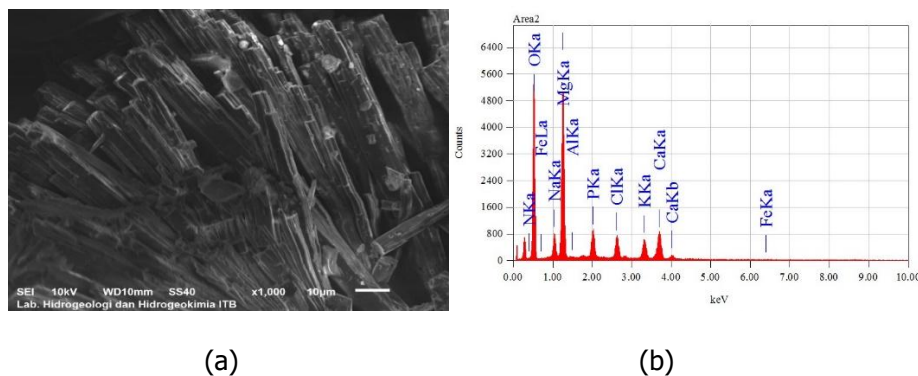
Debit (mL/menit)	Persamaan Linear	k (/jam)	R ²
1	$y = -0,1246x + 5,1889$	0,1246	0,9516
2	$y = -0,1564x + 5,6901$	0,1564	0,9945
3	$y = -0,1065x + 5,4489$	0,1065	0,9883
4	$y = -0,0948x + 5,7605$	0,0948	0,9892

3.6 Karakteristik Presipitat

Presipitat yang dihasilkan dari variasi debit 2 mL/menit diuji melalui SEM-EDS. Presipitat dianalisis menggunakan SEM untuk melihat morfologi presipitat yang ditunjukkan pada Gambar 7.a. Pada Gambar 7.a terlihat bahwa morfologi dari presipitat memiliki bentuk bongkahan besar tidak beraturan dan kristal berbentuk jarum yang memiliki kemiripan dengan struktur kristal struvite. Untuk mengetahui lebih lanjut kandungan unsur pada presipitat, dilakukan analisis EDS. Hasil analisis EDS dari variasi debit 2 mL/menit ditampilkan pada Gambar 7.b.

Berdasarkan hasil analisis EDS dengan metode *area analysis*, presipitat didominasi oleh unsur Mg dan O. Diperkirakan ini merupakan presipitat magnesium oksida ($MgO_{(s)}$) dan magnesium hidroksida ($Mg(OH)_{2(s)}$). Unsur ion kompetitor (Ca, Fe, dan K) juga terkandung dalam kedua area presipitat namun dalam jumlah yang kecil, yang menandakan ion kompetitor ikut membentuk presipitat bersama ion yang terkandung dalam larutan, baik ion pembentuk *struvite* maupun ion lainnya. Unsur P terkandung dalam kedua area presipitat walaupun dalam jumlah yang kecil. Berdasarkan spektrum hasil uji EDS pada gambar 7.b terdapat *peak* pada unsur N. Sehingga kemungkinan unsur N terdapat pada presipitat dalam jumlah yang sangat kecil sehingga oleh alat SEM-EDS terbaca 0% karena alat tersebut memiliki *limit detection*. Oleh karena itu, ada kemungkinan *struvite* ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) terbentuk pada sampel presipitat namun jumlahnya sangat kecil. Terdapat unsur K dan Na dalam presipitat sehingga kemungkinan pada sampel presipitat terbentuk *K-Struvite* ($MgKPO_4 \cdot 6H_2O$) dan *Na-Struvite* ($MgNaPO_4 \cdot 7H_2O$). Diperkirakan penyebab pembentukan *struvite* ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) terhambat adalah rasio molar pada penelitian kali ini yaitu Mg:NH₄:PO₄ adalah 89:3:0,4 sehingga tidak memenuhi rasio molar teoritis minimal pembentukan *struvite*, Mg:NH₄:PO₄ adalah 1:1:1. Konsentrasi ortofosfat yang tersedia di dalam air lindi terlalu rendah sehingga rasio molar minimal teoritis pembentukan *struvite*

tidak tercapai. Selain itu, ada kemungkinan gangguan dari ion kompetitor (Ca, Fe, dan K) yang mampu menghambat pembentukan *struvite* dengan cara berkompetisi dengan amonium untuk bereaksi dengan magnesium dan ortofosfat. Selain gangguan ion kompetitor, penyebab pembentukan *struvite* terhambat adalah amonium sebagai sumber ion pembentuk *struvite* yang berubah menjadi amonia yang bersifat volatil atau mudah menguap pada suhu ruang pada pH yang cukup tinggi sehingga sulit untuk terpresipitasi. Sehingga, dapat disimpulkan faktor penghambat pembentukan *struvite* adalah konsentrasi ortofosfat yang terlalu rendah sehingga tidak memenuhi molar rasio minimal pembentukan *struvite*, adanya gangguan yang berasal dari ion kompetitor (Ca, Fe, dan K), dan amonium yang sulit terpresipitasi karena berubah menjadi amonia yang bersifat volatil atau mudah menguap. Meskipun begitu, karena metode analisis EDS yang digunakan adalah *area analysis*, maka terdapat kemungkinan kandungan unsur yang terukur pada area ukur tidak homogen dengan seluruh presipitat yang terbentuk.



Gambar 7. (a) Morfologi; (b) hasil uji EDS komposisi unsur presipitat yang dihasilkan dari variasi debit 2 mL/menit

4. KESIMPULAN

Terdapat nilai debit resirkulasi optimum yaitu 2 mL/menit yang memberikan efisiensi penyisihan nutrisi, konstanta laju penyisihan nutrisi, dan massa presipitat tertinggi. Semakin tinggi nilai debit yang digunakan menyebabkan waktu detensi yang lebih singkat sehingga mengurangi efisiensi proses penyisihan nutrisi dan pembentukan presipitat. Sedangkan pada nilai debit yang terlalu rendah (< 2 mL/menit) menyebabkan suplai spesi ion ke dalam reaktor yang terlalu sedikit sehingga mengakibatkan reaksi kimia yang terjadi tidak mencapai kondisi optimum sehingga mengurangi efisiensi proses penyisihan nutrisi dan pembentukan presipitat. Presipitat yang dihasilkan berbentuk kristal berbentuk jarum didominasi oleh unsur Mg dan O. Unsur ion kompetitor (Ca, Fe, dan K) dan unsur P terkandung dalam presipitat dalam jumlah yang kecil. Persentase massa unsur N terhitung 0% oleh alat SEM-EDS, tetapi berdasarkan spektrum hasil uji EDS terdapat peak pada unsur N. Sehingga kemungkinan unsur N terdapat pada presipitat dalam jumlah yang sangat kecil sehingga oleh alat SEM-EDS terbaca 0% karena alat tersebut memiliki limit detection. Oleh karena itu, kemungkinan *struvite* ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) terbentuk pada sampel presipitat namun jumlahnya sangat kecil. Terdapat unsur K dan Na, sehingga kemungkinan terbentuk *K-Struvite* ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan *Na-Struvite* ($\text{MgNaPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Faktor penghambat pembentukan *struvite* adalah konsentrasi ortofosfat yang terlalu rendah sehingga tidak memenuhi molar rasio minimal pembentukan *struvite*, adanya gangguan yang berasal dari ion kompetitor, amonium yang sulit terpresipitasi karena berubah menjadi amonia yang bersifat volatil atau mudah menguap.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyanto, E., Niyati, Y., Kharismadewi, D., & Robiah, R. (2020). Kinetika Pembentukan Struvite Kristal Menggunakan Zeolit Alam sebagai Adsorben pada Aeration Cone Column Crystallizer. *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(1). <https://doi.org/10.22146/jrekpros.49406>.
- Bachtiar, Y. F. R. (2018). Studi Kristalisasi Struvite Pada Air Limbah Industri Pupuk Dengan Menggunakan Reaktor Fluidized Bed
- Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305.
- 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.
- Effendi, A. J., Amalia, F. L., & Hidayat, S. (2025). Effects of the presence of metal competitors on the formation of struvite recovered from nutrient-rich wastewater using air cathode electrocoagulation technology, 29, 102033.
- FAO. (2019). World Fertiliser Trends and Outlook to 2022.
- Huang, H., Zhang, D., Wang, W., Li, B., Zhao, N., Li, J., & Dai, J. (2019). Alleviating Na⁺ effect on phosphate and potassium recovery from synthetic urine by K-*struvite* crystallisation using different magnesium sources. *Science of the Total Environment*, 655, 211–219.
- Kim, J. H., An, B. Min, Lim, D. H., & Park, J. Y. (2018). Electricity production and phosphorus recovery as *struvite* from synthetic wastewater using magnesium-air fuel cell electrocoagulation. *Water Research*, 132, 200–210.
- Li, B., Huang, H. M., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, Y. F., Wang, G. Q., & Young, B. R. (2019). Phosphorus recovery through struvite crystallization: Recent developments in the understanding of operational factors. *Journal of Environmental Management*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.07.025>
- Liao, M., Liu, Y., Tian, E., Ma, W., & Liu, H. (2020). Phosphorous removal and high-purity *struvite* recovery from hydrolysed urine with spontaneous electricity production in Mg-air fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 391.
- Liu, B., Giannis, A., Zhang, J., Chang, V. W.-C., & Wang, J.-Y. (2013). Characterization of induced struvite formation from source-separated urine using seawater and brine as magnesium sources. *Chemosphere*, 93(11), 2738–2747. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.025>
- Mojiri, A., Zhou, J. L., Ratnaweera, H., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., & Asakura, H. (2021). Treatment of landfill leachate with different techniques: An overview. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 11(1), 66–96. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.079>.
- Muryanto, S., & Bayuseno, A. P. (2014). Influence of Cu²⁺ and Zn²⁺ as additives on crystallisation kinetics and morphology of struvite. *Powder Technology*, 253, 602–607. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.12.027>.
- Pastor, L., Mangin, D., Barat, R., & Seco, A. (2008). A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: Conditions influencing the process. *Bioresource Technology*, 99(14), 6285–6291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.003>.
- Rahman, M. M., Salleh, M. A. M., Rashid, U., Ahsan, A., Hossain, M. M., & Ra, C. S. (2014). Production of slow-release crystal fertiliser from wastewaters through *struvite* crystallisation—A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(1), 139–155.
- Rajaniemi, K., Hu, T., Nurmesniemi, E. T., Tuomikoski, S., & Lassi, U. (2021). Phosphate and ammonium removal from water through electrochemical and chemical precipitation of *struvite*. *Processes*, 9(1), 1–13.

- Sall, P. M., Antoun, H., Chalifour, F. P., & Beauchamp, C. J. (2019). Potential use of leachate from composted fruit and vegetable waste as fertiliser for corn. *Cogent Food and Agriculture*, 5(1).
- Shaddel, S., Ucar, S., Andreassen, J. P., & Sterhus, S. W. (2019). Engineering of *struvite* crystals by regulating supersaturation—Correlation with phosphorus recovery, crystal morphology and process efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1).
- Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., & Johnson, J. (2006). An economic evaluation of phosphorus recovery as *struvite* from digester supernatant. *Bioresource Technology*, 97(17), 2211–2216.
- Tian, Y., He, W., Zhu, X., Yang, W., Ren, N., & Logan, B. E. (2016). Energy-efficient electrocoagulation using an air-breathing cathode to remove nutrients from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 292, 308–314.
- Trang, N. T. T., Yen, L. T. H., Hanh, L. T. H., & Thanh, B. X. (2018). Struvite Formation from Wastewater: Affecting Factors and Nutrient Recovery. *GeoScience Engineering*, 64(1), 9–13. <https://doi.org/10.2478/gse-2018-0002>.
- Ueno, Y., & Fujii, M. (2001). Three Years Experience of Operating and Selling Recovered Struvite from Full-Scale Plant. *Environmental Technology*, 22(11), 1373–1381. <https://doi.org/10.1080/09593332208618196>
- UN. (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision*.
- Valin, H., Sands, R. D., van der Mensbrugghe, D., Nelson, G. C., Ahammad, H., Blanc, E., Bodirsky, B., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., Heyhoe, E., Kyle, P., Mason-D'Croz, D., Paltsev, S., Rolinski, S., Tabeau, A., van Meijl, H., von Lampe, M., & Willenbockel, D. (2014). The future of food demand: Understanding differences in global economic models. *Agricultural Economics (United Kingdom)*, 45(1), 51–67.
- Yesigat, A., Worku, A., Mekonnen, A., Bae, W., Feyisa, G. L., Gatew, S., Han, J.-L., Liu, W., Wang, A., & Guadie, A. (2022). Phosphorus recovery as K-struvite from a waste stream: A review of influencing factors, advantages, disadvantages and challenges. *Environmental Research*, 214, 114086. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114086>.