

Pemanfaatan Reaktor *Fluidized Bed* untuk Menurunkan Kadar Fosfat pada Limbah Cair

Yessie Ardina Kusuma^{1*} Ridho Akbar²

Departement of Industrial Engineering, Universitas Muhammadiyah Surabaya^{1,2}
yessie.ardina@um-surabaya.ac.id¹ ridho.akbar@um-surabaya.ac.id²

Article Information

Article history:

Received Agustus 07, 2022
Revised November 19, 2022
Accepted Desember 12, 2022

Keyword:

Phosphate
Crystallization
Fluidized Bed Reactors
Struvite

ABSTRACT

Pemanfaatan sumber daya alam dalam suatu proses produksi selain menghasilkan produk utama juga menghasilkan produk sampingan berupa limbah yang dapat mencemari lingkungan. Limbah cair dari industri pupuk perlu diolah karena mengandung fosfat yang tinggi sebelum dibuang ke air. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bentuk karakteristik *struvite* selama proses kristalisasi menggunakan reaktor *fluidized bed*, yaitu mengetahui perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ yang efektif. Tahapan dari studi ini antara lain pengujian karakteristik limbah cair industri pupuk, penyiapan alat dan bahan, penelitian pendahuluan, dan penelitian utama. Perbedaan perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ yang digunakan dalam penelitian ini berturut – turut yaitu 1:1, 7:1, dan 1:15:1. Menggunakan reaktor *fluidized bed* dengan dua dan tiga kompartemen, prosedur kristalisasi dilakukan secara berkelanjutan dengan durasi 70 menit. Pasir silika dengan ukuran mesh 30 – 60 adalah bahan yang digunakan. $MgCl_2$ digunakan sebagai bahan presipitan, dan pH diatur menjadi 8-9. Pengubahan fosfat menjadi kristal *struvite* menggunakan metode kristalisasi reaktor *fluidized bed* sangat efisien. Efisiensi *removal* fosfat dalam penelitian ini adalah 98 persen, dengan perbandingan molar efektif 1:15:1 untuk $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$. Kristal *struvite* yang dihasilkan memiliki permukaan yang rata dan menyerupai kristal berbentuk kubus.

© This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

*Corresponding Author:

Yessie Ardina Kusuma
Departement of Industrial Engineering
Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl. Sutorejo 59, Surabaya, Indonesia
Email: yessie.ardina@um-surabaya.ac.id¹

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan sumber daya alam dengan menggunakan teknologi dilakukan oleh manusia untuk menghasilkan sebuah produk yang dapat memenuhi kebutuhan hidup manusia. Sumber daya alam tersebut tidak sepenuhnya dapat dikelola menjadi produk utama namun juga menghasilkan produk samping berupa limbah yang dengan kandungan sejumlah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dapat mencemari lingkungan. Pengertian pencemaran lingkungan menurut Undang - Undang UU Nomor 32 Tahun 2009 merupakan masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Pencemaran lingkungan disebabkan oleh proses alamiah seperti tanah longsor, banjir, gunung meletus dan lain sebagainya. Selain dari proses alamiah, pencemaran lingkungan juga disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pada kegiatan

industri, pertanian, pertambangan dan kegiatan lainnya yang menghasilkan limbah. Dalam hal pengembangan kegiatan industri ataupun kawasan industri harus memperhatikan tipologi lingkungan setempat dan ekologi lokal, sebagai patokan atau tolak ukur. Sebagai contoh faktor kunci dari tipologi lingkungan lokal, lokasi industri yang akan dibangun umumnya mempunyai keterbatasan kemampuan dalam penyediaan sumber energi yang berasal dari alam dan material pada input proses produksi. Begitu juga dalam hal keterbatasan kemampuan lingkungan untuk menerima dan menyerap limbah agar dapat memperhatikan daya dukung dan daya tampung lingkungan industri secara berkelanjutan [1].

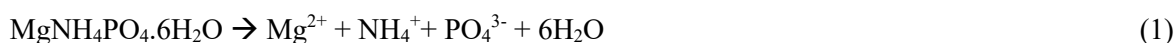
Pupuk fosfor komersial terbuat dari batuan fosfat alami, yang banyak didistribusikan ke berbagai negara, termasuk AS, Cina, Maroko, dan Rusia, dan menyumbang 75 persen dari total produksi fosfor dunia. Bertambahnya permintaan pangan dunia, memungkinkan terjadi penurunan stok fosfor yang tajam [2]. Salah satu industri yang menghasilkan limbah cair dengan kandungan amonium dan fosfat yang tinggi adalah industri pupuk, yaitu Perseroan Terbatas (PT) Petrokimia Gresik masing-masing sebesar 12282,60 miligram per liter dan 4180,33 miligram per liter [3]. Ketika terdapat konsentrasi fosfat dan amonium yang tinggi dalam badan air, hal ini dapat menyebabkan eutrofikasi, yang menurunkan kadar *Dissolved Oxygen* (DO), yang mengakibatkan kondisi anoksik. Peningkatan pertumbuhan fitoplankton, bau, kekeruhan, dan kematian ikan adalah efek dari pemuatan nutrisi yang berlebihan di danau dan kolam. Deoksigenasi tanaman air juga merupakan akibat dari pemuatan nutrisi yang berlebihan. Untuk mencegah eutrofikasi, mengolah limbah cair, dan menghemat sumber daya yang terbatas, diperlukan industri pupuk [4]. Memulihkan fosfat yang ada dalam limbah cair memungkinkan pengolahan limbah dari industri pupuk.

Proses kristalisasi *struvite* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghilangkan fosfat dan amonium dari limbah cair. Perbandingan molar, pH, laju pencampuran, waktu, kecepatan penyediaan oksigen, keberadaan ion pengotor, dan bentuk reaktor semuanya berdampak pada kristalisasi *struvite* [5]. Menurut [6], perbandingan molar $[Mg^{2+}] : [NH_4^+] : [PO_4^{3-}]$ yang efektif digunakan selama proses pembentukan *struvite* adalah 1:1:1, sedangkan [3] menyatakan bahwa perbandingan molar $[Mg^{2+}] : [NH_4^+] : [PO_4^{3-}]$ adalah 1,5:15:1. pH efektif yang dibutuhkan untuk membentuk *struvite* adalah 8,5 [3], [6]. pH yang efektif adalah pada 9 [7]. Dengan memperpanjang waktu dan kecepatan pencampuran, dimungkinkan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan fosfat dalam air limbah [8]. $MgCl_2$ merupakan sumber magnesium yang digunakan sebagai *precipitating agent* karena $MgCl_2$ memiliki tingkat kelarutan yang tinggi selama kristalisasi *struvite* [6].

Reaktor *fluidized bed crystallization* (FBC), yaitu metode granulasi yang menggunakan pasir silika untuk difluidisasi dalam reaktor dan menghasilkan *struvite*, digunakan untuk melakukan proses kristalisasi *struvite* [4]. Butiran kristal *struvite*, pupuk *slow release* terbaik, dihasilkan oleh proses kristalisasi ini, yang juga memiliki keuntungan mengambil lebih sedikit ruang dalam pengolahan air limbah [9]. Studi ini akan menetapkan perbandingan molar kristalisasi *struvite* yang efektif dan mengidentifikasi sifat-sifat kristal *struvite* yang terbentuk dalam reaktor *fluidized bed*.

2. KAJIAN PUSTAKA

Ketika partikel zat padat terbentuk dalam bentuk homogen, proses tersebut dinamakan kristalisasi. Jika ada kelebihan padatan terlarut atau sistem tidak seimbang, kristalisasi dalam larutan dapat membuat sistem kembali seimbang melalui pengkristalan padatan terlarut. Supersaturasi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan *driving force* akibat gradien konsentrasi ini. *Magnesium ammonium phosphate* (MAP), juga dikenal sebagai *struvite* ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), adalah produk sampingan utama dari kristalisasi fosfat. *Struvite* adalah zat kristal putih yang mengandung fosfor, amonium, dan magnesium dalam jumlah setara. Proses kristalisasi terjadi di dalam kondisi pH basa. *Struvite* dapat berbentuk mineral halus dengan berat jenis yang rendah (1,7), dimana tidak mudah terhanyut oleh air hujan sehingga cocok digunakan sebagai pupuk di daerah banjir [10]. Berdasarkan [3] dan rasio Mg/P 1,5, pKsp 13,26, serta suhu 25°C, reaksi berikut menghasilkan pembentukan *struvite*:



Pertumbuhan kristal *struvite* dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor:

1. Perbandingan molar

Menurut penelitian sebelumnya oleh [6], proses kristalisasi *struvite* memiliki pH ideal 8,5 dan perbandingan molar 1:1:1 untuk unsur $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$. Berdasarkan [5], *struvite* dapat disebut sebagai pupuk *slow release* karena kristal *struvite* mempunyai karakteristik tingkat kelarutan yang rendah pada pH netral. Pupuk *struvite* tidak membakar akar tanaman jika digunakan secara berlebihan karena sifatnya *slow release* [5].

2. Kecepatan

Ketika *struvite* terbentuk, faktor kecepatan aliran harus memadai karena kecepatan aliran harus cukup tinggi untuk mendukung pertumbuhan kristal *struvite*. Kristal *struvite* yang tumbuh dengan baik memiliki ukuran tertentu yang diperkirakan akan mengendap lebih cepat. Inti kristal yang baru tumbuh dapat terbelah dalam kondisi aliran yang berlebihan, yang akan mengurangi ukuran kristal [11]. Berdasarkan [12], diameter minimum *struvite* yang akan diperoleh kembali ditentukan oleh kecepatan *upflow*. Saat debit influen meningkat, diameter *struvite* minimum juga akan meningkat. Hal ini terjadi sebagai akibat dari fakta bahwa ketika kecepatan aliran naik, densitas cairan akan menurun, menyebabkan aliran resirkulasi tinggi yang dapat menaikkan ukuran diameter minimum *struvite*. Kristal *struvite* yang sudah sesuai diameter minimum akan ditempatkan di kolektor, tetapi *struvite* yang memiliki diameter lebih kecil akan disirkulasi kembali hingga mencapai ukuran diameter minimum yang dibutuhkan. Ini juga terjadi karena nukleasi kristal yang lebih cepat dan kecepatan pengadukan yang lebih baik untuk pertumbuhan kristal dikaitkan dengan laju *upflow* yang lebih tinggi [9].

3. Pengkonfigurasi Reaktor

Ditemukan dalam studi sebelumnya bahwa konfigurasi bentuk reaktor FBC dan variasi kompartemen saat ini dapat berdampak. Reaktor *fluidized bed* dengan tiga kompartemen memiliki efisiensi penyisihan fosfat yang lebih tinggi dalam jenis air limbah yang sama, khususnya limbah sintesis, dengan laju 60–98 persen. Efisiensi penghilangan fosfat menggunakan dua kompartemen, bagaimanapun, hanya 40-80 persen [5].

4. Bahan media tumbuh

Fakta bahwa bahan media tumbuh menawarkan permukaan tempat *struvite* dapat tumbuh, bahan media tumbuh sangat penting dalam pembentukan *struvite*. Kelarutan yang rendah dalam kondisi asam merupakan syarat bahan benih yang dapat membentuk *struvite*. Efek pemberian pasir silika dapat mempercepat kristalisasi *struvite* dan menunjukkan bahwa pasir silika harus dapat menghasilkan ukuran yang memadai dengan meniru struktur kristal yang diendapkan. Dengan memberikan permukaan yang cocok untuk reaksi, penggunaan *seed* dianggap meningkatkan kristalisasi *struvite*. Dengan demikian, penghilangan fosfat dapat dipengaruhi oleh luas permukaan *seed* [13].

Seeding bahan inert dapat digunakan untuk meningkatkan terbentuknya nukleasi sekunder, menurut [12]. Selama proses kristalisasi *struvite*, pasir silika dapat secara signifikan mempersingkat waktu *ekuilibrium*, waktu kesetimbangan, dan korelasi antara konsentrasi reaktan dan waktu kristalisasi, menurut [14]. Menurut sejumlah peneliti bahan *seed* yang digunakan adalah pasir silika.

5. pH

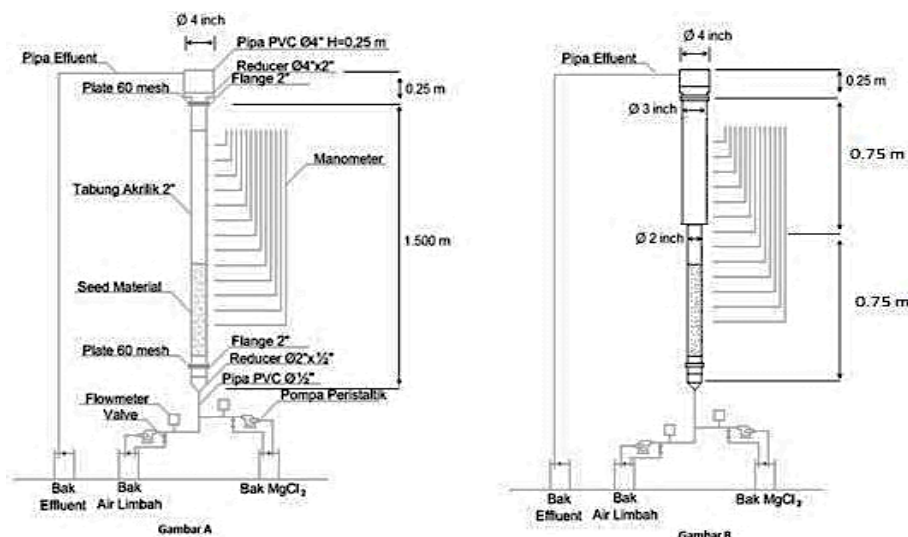
Aktivitas ion - ion, efisiensi reagen presipitasi, dan mekanisme ion pengganggu semuanya dipengaruhi oleh pH, yang merupakan faktor utama dalam pengendapan *struvite* [15]. Kualitas kristal yang diendapkan dapat dipengaruhi oleh laju penurunan pH, yang berbanding lurus dengan laju pertumbuhan kristal. Dimungkinkan untuk menggunakan pH sebagai indikator nukleasi *struvite* [10]. Lebih dari 90 persen lebih banyak fosfat dapat dihilangkan ketika pH dinaikkan menjadi 8,3 atau lebih tinggi. Kristal lain selain *struvite*, yaitu kristal *bobierite*, dapat terbentuk pada nilai pH di atas 10 [3].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Persiapan Alat dan Bahan

Peralatan penelitian yang digunakan antara lain reaktor *fluidized bed*, pH meter, neraca analitik untuk menimbang kristal *struvite* dan zat analitik, oven dan pompa vakum untuk mengukur kadar TSS, dan *Spectrophotometer* (*Spectroquant Nova 60A*) untuk memeriksa kadar fosfat,

amonium, dan fluoride dalam limbah cair sebelum dan sesudah pengolahan. Magnesium klorida ($MgCl_2$), NH_4OH sebagai sumber amonium sintetik untuk proses kristalisasi *struvite*, $NaOH$ dan H_2SO_4 untuk mengatur pH air limbah, dan reagen untuk analisis amonium, fosfat, dan fluoride adalah bahan yang digunakan dalam penelitian ini. Reaktor *fluidized bed* yang digunakan memiliki dua dan tiga kompartemen. Gambar 1 menunjukkan gambar reaktor *fluidized bed*.



Gambar 1. Desain reaktor *fluidized bed* (A) dua kompartemen dan (B) tiga kompartemen

3.2 Penelitian Awal

Karakteristik air limbah PT Petrokimia Gresik diuji pada awal proses penelitian, meliputi kadar fosfat, amonium, fluoride, magnesium, kalsium, pH, dan TSS. Kecepatan minimum dan kecepatan maksimum ditetapkan selama proses kristalisasi dalam reaktor *fluidized bed*. Pasir silika digunakan sebagai bahan benih. Aliran limbah cair yang digunakan pada penelitian ini memiliki variabel kecepatan 0,014 meter per detik, 0,02 meter per detik, dan 0,027 meter per detik, dengan laju debit air limbah 1,6 L/menit, 2,4 L/menit, dan 3,2 L/menit. 0,014 meter per detik adalah laju aliran terendah yang tercatat dalam penelitian ini, dan proses kristalisasi memakan waktu 70 menit. Reaktor *fluidized bed* dua kompartemen vertikal dapat menghilangkan fosfat dan amonium dari air limbah pupuk pada laju ini masing-masing sebesar 85 persen dan 55 persen. Ketika kecepatan 0,014 meter per detik dipilih, periode penyumbatan dalam reaktor yang disebabkan oleh pengendapan *struvite* yang terbentuk juga diperhitungkan. Reaktor *fluidized bed* yang digunakan dalam penelitian ini adalah desain vertikal, dua dan tiga kompartemen.

3.3 Penelitian Utama

Pada dua jenis reaktor *fluidized bed* yang berbeda, proses pengkristalan limbah cair akan berlangsung selama 70 menit. Pada penelitian ini perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ adalah 1:5:1:7 dan 1:5:15:1. Menurut penelitian [4], kristalisasi juga dilakukan dengan menggunakan konsentrasi amonium yang lebih tinggi dalam air limbah sintetik dengan rasio Mg/N/P 1,3/4/1 dan efisiensi penyisihan fosfat 95,8 persen. Perbandingan molar 1,5:15:1 juga didukung oleh penelitian [3] dengan sistem batch yang memiliki efisiensi 99,99 persen dalam penyisihan fosfat. Perbandingan molar 1,5:15:1 dicapai dengan menambahkan NH_4OH ke limbah cair untuk menaikkan jumlah molar amonium, yang terlalu rendah.

Setiap 5 menit, sampel diambil untuk diperiksa kadar pH, fosfat, dan amonium air limbah. Sampel efluen dikumpulkan untuk diuji sesuai dengan kriteria yang dimaksud, seperti uji TSS, residu fosfat dan amonium, fluoride, dan karakteristik kristal *struvite*. Menggunakan sinar matahari untuk mengeringkan bahan media tumbuh adalah langkah pertama dalam menciptakan kristal *struvite*. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerusakan pada struktur kristal *struvite* yang sedang tumbuh [3]. Dengan bantuan *Scanning Electron Microscopy-Energy Diffraction-X-Ray* (SEM-EDX), kristal *struvite* kering diperiksa untuk mengidentifikasi sifat permukaannya.

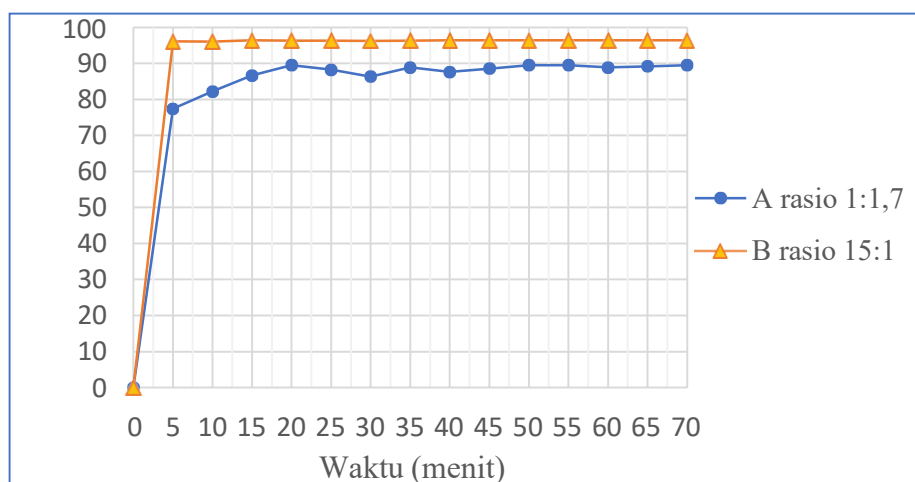
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Limbah Cair

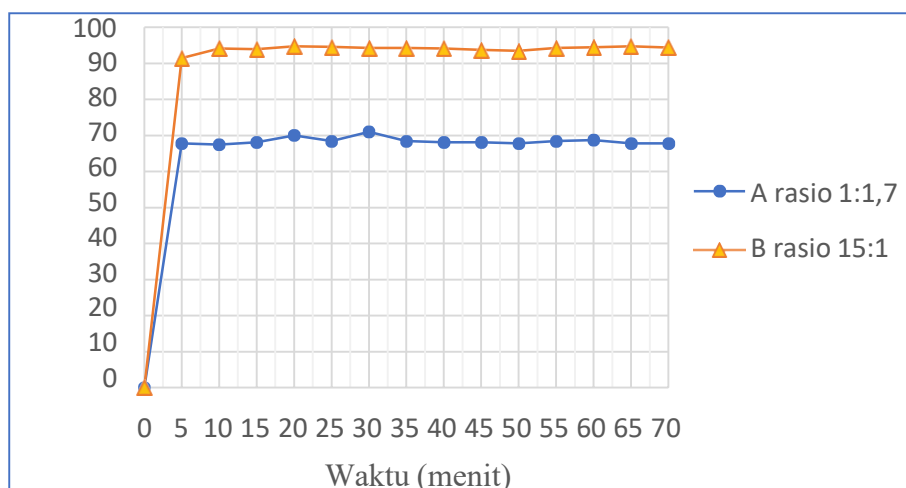
Untuk mengetahui perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$, maka diperlukan data uji karakteristik limbah cair yang dihasilkan oleh PT Petrokimia Gresik antara lain kadar fosfat, amonium, dan magnesium sebesar 8245,16 miligram per liter, 900 miligram per liter, dan 5,17 miligram per liter. Dari data tersebut dapat diketahui rasio limbah cair asli adalah 1,5:1:1,7. Penelitian ini juga menggunakan perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1:15:1 selain perbandingan molar asli, yang mengharuskan penambahan NH_4OH ke air limbah untuk memenuhi perbandingan molar penelitian tersebut.

4.2 Pengaruh Perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ terhadap *removal* Fosfat

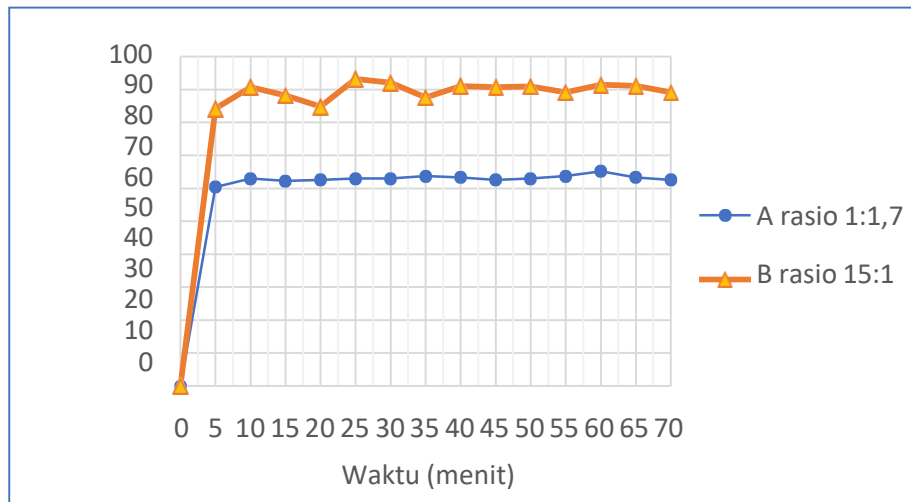
Gambar 2-7 mengilustrasikan efek dari hasil yang menunjukkan bahwa perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ berdampak pada *removal* fosfat. Gambar 2-4 mengilustrasikan pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada penyisihan fosfat dengan kecepatan aliran 0,014 meter per detik, 0,02 meter per detik, dan 0,027 meter per detik dalam dua reaktor kompartemen.



Gambar 2. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor dua kompartemen dengan kecepatan 0,014 meter per detik.

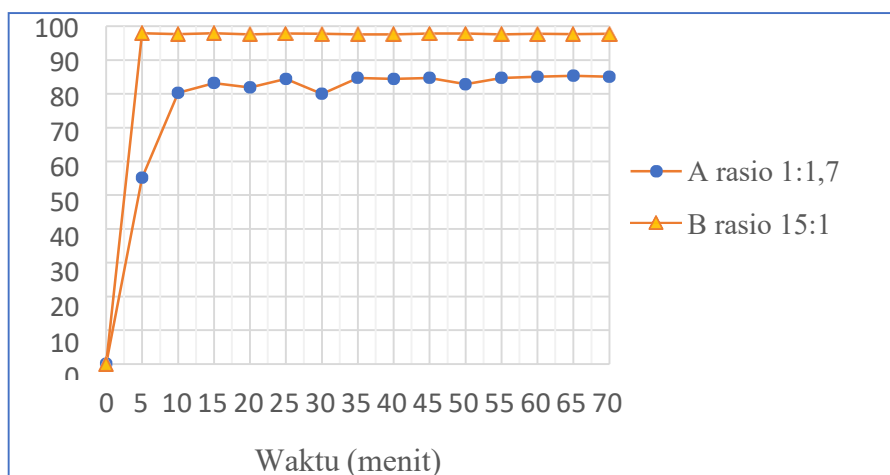


Gambar 3. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor dua kompartemen dengan kecepatan 0,02 meter per detik.

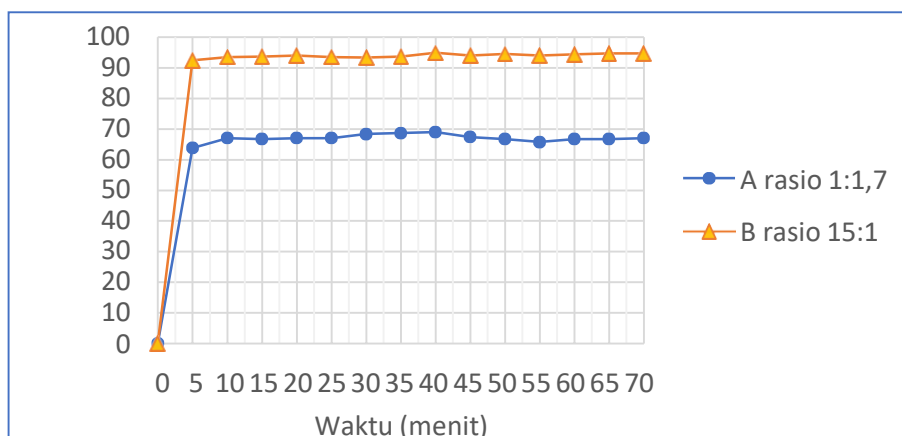


Gambar 4. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor dua kompartemen dengan kecepatan 0,0127meter per detik.

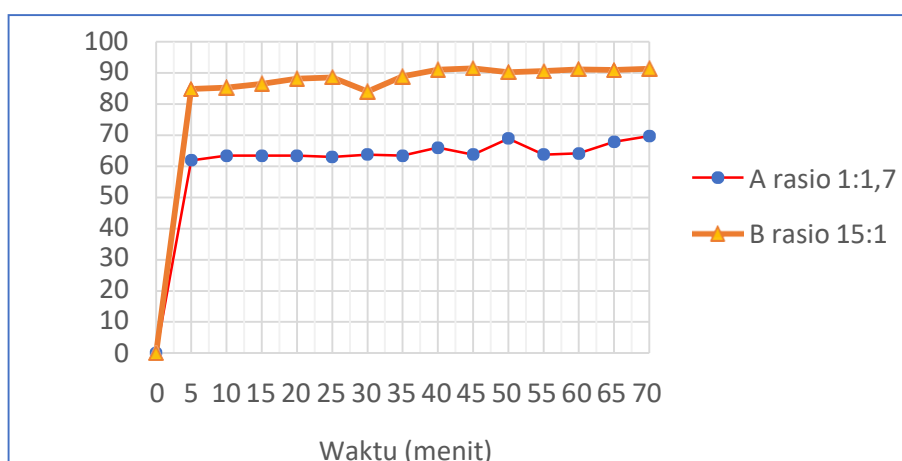
Gambar 5-7 mengilustrasikan pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada *removal* fosfat pada reaktor tiga kompartemen. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, efisiensi *removal* fosfat tertinggi adalah pada perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1,5:15:1, yaitu 98 persen. Gambar 2 menunjukkan bahwa pada perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1,5:1:1,7, sebesar 89 persen fosfat dapat dihilangkan. Hasilnya menunjukkan bahwa perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1,5:15:1 menghasilkan efisiensi tertinggi. Menurut penelitian [5] pada pengolahan limbah cair sintetik, peningkatan rasio N/P air limbah dari 1 menjadi 10 dapat menghasilkan persentase *removal* fosfat sebesar 65 persen hingga 90 persen. Senada dengan itu, pada [3] menemukan bahwa dengan meningkatnya perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1,5:15:1, yaitu sebesar 99,99 persen, persentase penyisihan fosfat dapat meningkat. Pada air limbah sintetik, perbandingan molar 1,3:4:1 $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ juga cukup efektif dalam me-*removal* fosfat sebesar 95,8 persen, menurut penelitian [4].



Gambar 5. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor tiga kompartemen dengan kecepatan 0,014 meter per detik.



Gambar 6. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor tiga kompartemen dengan kecepatan 0,02 meter per detik.

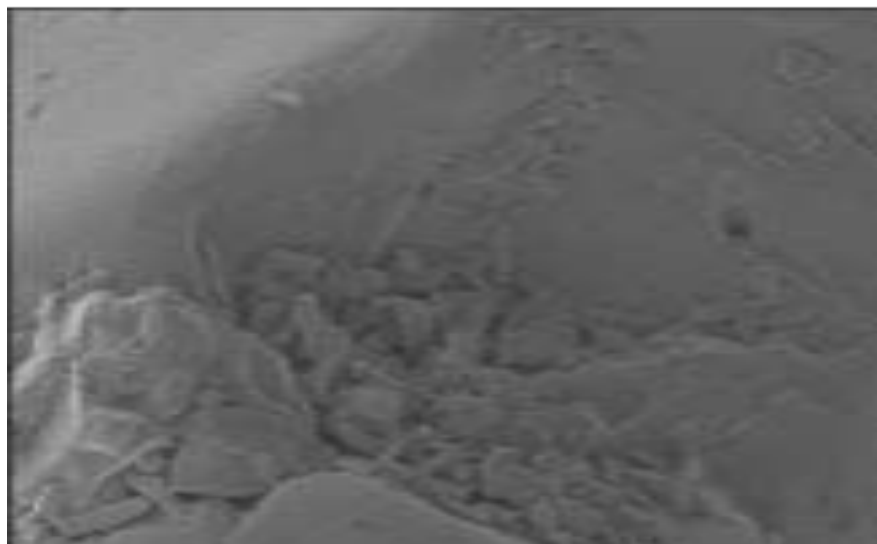


Gambar 7. Pengaruh perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ pada laju *removal* fosfat pada reaktor tiga kompartemen dengan kecepatan 0,027 meter per detik.

Menurut hasil penelitian, perbandingan molar $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ limbah cair asli 1,5:1:1,7 cukup untuk melakukan *removal* fosfat dari air limbah, dan peningkatan persentase *removal* fosfat dari 1,5:1:1,7 menjadi 1,5:15:1 hanya 13 persen. Akibatnya, penambahan NH_4OH mungkin tidak diperlukan untuk mencapai *removal* fosfat tertinggi. Selain itu, dapat mengurangi kebutuhan bahan kimia NH_4OH yang digunakan untuk menghasilkan amonium molar tinggi.

4.3 Karakteristik kristal *struvite*

Analisis SEM pasir silika yang mengandung kristal *struvite* dapat digunakan untuk menentukan sifat-sifat kristal. Karakteristik morfologi atau permukaan bahan media tumbuh yang terbentuk dan endapannya diperiksa menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Sampel yang diperiksa adalah pasir silika hasil proses kristalisasi dengan perbandingan $[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$ 1,5:15:1, kecepatan 0,014 meter per detik, dan menggunakan reaktor *fluidized bed* tiga kompartemen. Berdasarkan sampel yang memiliki tingkat efisiensi tertinggi untuk reduksi fosfat, Gambar 7 menunjukkan bagaimana kristal *struvite* yang terbentuk melekat pada permukaan bahan media tumbuh pasir silika. Kristal *struvite* memiliki permukaan yang rata dan menyerupai kristal berbentuk kubus.



Gambar 7. Hasil uji SEM bahan media tumbuh perbesaran 1500 kali pada bahan silika.

5. KESIMPULAN

Perbandingan molar $[Mg^{2+}] : [NH_4^+] : [PO_4^{3-}]$ efektif dalam pembentukan kristal *struvite* adalah 1,5:15:1. Kristal *struvite* yang tumbuh pada *seed* memiliki sifat yang menyerupai kristal berbentuk kubus dengan permukaan yang rata.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Reda Rizal, *Manajemen ekologi industri : pengembangan sistem industri berkelanjutan dan berwawasan lingkungan*. Jakarta: UI-Press, 2013.
- [2] S. Kataki, H. West, M. Clarke, and D. C. Baruah, "Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 107, pp. 142–156, 2016.
- [3] W. P. Iswarani and I. Warmadewanthi, "Recovery fosfat dan amonium menggunakan teknik presipitasi struvite," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 1, pp. F183–F185, 2018.
- [4] Y.-J. Shih, R. R. M. Abarca, M. D. G. de Luna, Y.-H. Huang, and M.-C. Lu, "Recovery of phosphorus from synthetic wastewaters by struvite crystallization in a fluidized-bed reactor: effects of pH, phosphate concentration and coexisting ions," *Chemosphere*, vol. 173, pp. 466–473, 2017.
- [5] A. Guadie *et al.*, "Enhanced struvite recovery from wastewater using a novel cone-inserted fluidized bed reactor," *J. Environ. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 765–774, 2014.
- [6] A. R. Fitriana and I. Warmadewanthi, "Penurunan kadar amonium dan fosfat pada limbah cair industri pupuk," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. F107–F111, 2016.
- [7] N. Ikhlas, "Pengaruh pH, Perbandingan molar, Jenis Presipitan, dan Ion Pengganggu Dalam Recovery Amonium dan Fosfat Pada Limbah Cair PT Petrokimia Gresik dengan Metode Presipitasi Struvite." Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [8] A. D. Anggrainy, "Penyisihan Dan Recovery Fosfat Dari Air Limbah Rumah Sakit Dengan Proses Kristalisasi." Institut Technology Sepuluh Nopember, 2015.
- [9] M. I. H. Bhuiyan, D. S. Mavinic, and F. A. Koch, "Phosphorus recovery from wastewater through struvite formation in fluidized bed reactors: a sustainable approach," *Water Sci. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 175–181, 2008.
- [10] M. M. Rahman, M. A. M. Salleh, U. Rashid, A. Ahsan, M. M. Hossain, and C. S. Ra, "Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization—A review," *Arab. J. Chem.*, vol. 7, no. 1, pp. 139–155, 2014.
- [11] J. Wang, J. G. Burken, and X. Zhang, "Effect of seeding materials and mixing strength on struvite precipitation," *Water Environ. Res.*, vol. 78, no. 2, pp. 125–132, 2006.

- [12] E. Tarragó, S. Puig, M. Rusalleda, M. D. Balaguer, and J. Colprim, "Controlling struvite particles' size using the up-flow velocity," *Chem. Eng. J.*, vol. 302, pp. 819–827, 2016.
- [13] M. S. Rahaman, N. Ellis, and D. S. Mavinic, "Effects of various process parameters on struvite precipitation kinetics and subsequent determination of rate constants," *Water Sci. Technol.*, vol. 57, no. 5, pp. 647–654, 2008.
- [14] Z. Liu, Q. Zhao, L. Wei, D. Wu, and L. Ma, "Effect of struvite seed crystal on MAP crystallization," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 86, no. 11, pp. 1394–1398, 2011.
- [15] J. C. Liu, "Recovery of phosphate and ammonium as struvite from semiconductor wastewater," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 64, no. 3, pp. 368–373, 2009.