

Penurunan Kadar Amonium dan Fosfat pada Limbah Cair Industri Pupuk

Aulia Rodlia Fitriana dan IDAA Warmadewanthi

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: warma@its.ac.id

Abstrak — Limbah cair industri pupuk mengandung kadar amonium dan fosfat yang cukup tinggi. Kadar ini dihasilkan dari kegiatan produksi pabrik amoniak dan pabrik asam fosfat. Penurunan amonium dan fosfat ini dapat dilakukan melalui proses presipitasi kimiawi dan menghasilkan mineral *Magnesium Ammonium Phosphate* (MAP) atau *Struvite*. Sumber Mg yang akan digunakan adalah $MgCl_2$. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan sistem *batch*. Variabel yang digunakan adalah kecepatan pengadukan, pH, dan rasio molar $[Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}]$. pH yang akan digunakan adalah 7,5; 8; dan 8,5. Sedangkan rasio molar yang digunakan adalah 1:1:1; 1,5:1:1; dan 2:1:1. Kedua hasil variabel ini merupakan hasil dari permodelan Visual MINTEQ v3.0. Variasi G.td yang digunakan adalah $0,5 \cdot 10^6$; 10^6 ; dan $1,5 \cdot 10^6$. Presipitasi dilakukan selama 60 menit dan dilanjutkan dengan proses sedimentasi selama 30 menit. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah presentase removal amonium dan fosfat optimum terjadi pada pH 8,5 dan rasio molar 1:1:1 dengan G.td 10^6 atau setara dengan 158 rpm. Kadar amonium awal sebesar 2864 mg/L dan fosfat sebesar 14656 mg/L. *Residual* amonium sebesar 396,82 mg/L dan *residual* fosfat sebesar 148,86 mg/L. *Residual* amonium dan fosfat pada penelitian ini masih tinggi.

Kata Kunci — amonium, fosfat, pengadukan, presipitasi, *struvite*

I. PENDAHULUAN

Limbah cair industri pupuk dan asam fosfat mengandung amonium dan fosfat yang tinggi. Oleh karena itu sebelum dibuang ke badan air penerima diperlukan pengolahan terlebih dahulu agar effluennya dapat memenuhi baku mutu. Kadar amonium dan fosfat yang tinggi pada perairan akan menyebabkan terjadinya eutrofikasi. Eutrofikasi ini dapat menurunkan kadar DO (*Dissolved Oxygen*) sehingga akan terjadi kondisi anoksik.

Teknik penurunan kadar fosfat dapat dilakukan dengan cara presipitasi kimiawi. Presipitasi amonium fosfat akan menghasilkan *magnesium ammonium phosphate* (MAP) atau sering disebut *struvite* ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) [1]. Presipitasi amonium fosfat dapat menggunakan berbagai sumber Mg sebagai agen presipitan. Urutan keunggulan presipitan dalam mereduksi fosfat adalah $MgCl_2 > MgSO_4 > MgO > Mg(OH)_2 > MgCO_3$ [2]. Pada penelitian ini akan menggunakan $MgCl_2$ sebagai sumber Mg karena memiliki kelarutan yang tinggi dalam presipitasi *struvite*.

Presipitasi *struvite* memiliki beberapa keunggulan antara

lain *struvite* yang dihasilkan dapat melepaskan nutrisi pada tingkat yang lebih lambat dibandingkan dengan pupuk lainnya [3]. *Struvite* juga digunakan sebagai pupuk dengan kandungan logam rendah dibandingkan dengan batuan fosfat yang ditambang dan dipasok ke industri pupuk [4]. Selain itu *struvite* menjadi sumber N, Mg^{2+} , dan P yang sangat efektif untuk tanaman dan dapat digunakan sebagai pupuk *slow release* tanpa merusak akar tanaman [5;6].

Presipitasi *struvite* dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya pH, komposisi kimia air limbah (derajat kejenuhan terhadap magnesium, amonium dan fosfat; kehadiran ion lainnya; kekuatan ion) dan suhu larutan [7]. Faktor yang paling berpengaruh pada presipitasi *struvite* adalah rasio molar $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ dan pH [8] serta gradien kecepatan.

Penelitian ini akan menghasilkan rasio molar $[Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}]$, pH, dan kecepatan pengadukan optimum dalam presipitasi *struvite* pada limbah cair Industri Pupuk. Permodelan rasio molar dan pH dilakukan terlebih dahulu menggunakan *software* Visual MINTEQ (*version 3.0*). Setelah didapatkan variasi rasio molar dan pH, barulah dilakukan pengujian terhadap variasi tersebut dalam skala laboratorium. Pengujian dilakukan menggunakan sistem *batch* dengan $MgCl_2$ sebagai agen presipitan.

II. METODE PENELITIAN

Secara keseluruhan pelaksanaan penelitian dibagi dalam dua tahapan, meliputi:

A. Penelitian Pendahuluan

Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengetahui karakteristik air limbah industri pupuk. Parameter yang akan diuji adalah pH, kekeruhan, kadar amonium, kadar fosfat, COD, magnesium, dan kalsium. Pada tahap ini juga akan dilakukan presipitasi menggunakan *software* Visual MINTEQ v3.0. *Software* ini digunakan untuk memprediksi rasio molar $[Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}]$ dan pH yang potensial terjadi untuk presipitasi *struvite*. Cara menggunakan Visual MINTEQ yaitu dengan memasukkan data karakteristik limbah serta mengatur pH yang diinginkan. Nilai variasi pH yang digunakan adalah 7 – 13 dengan kenaikan pH 0,5. Rasio molar $[Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}]$ yang akan digunakan adalah 1:1:1 hingga 3:1:1 dengan kenaikan molar $[Mg^{2+}]$ sebesar 0,5. Kemudian dipilih 3 variasi hasil optimum berdasarkan pH dan

rasio molar sebagai variabel penelitian. Variabel kecepatan pengadukan mengacu ada penelitian [9] dan [10]. Penelitian menunjukkan bahwa presipitasi *struvite* akan terjadi secara maksimal saat $G \times t_d$ mendekati $0,5 \times 10^6$ [9] dan 10^6 [10]. Kedua variasi $G \times t_d$ akan digunakan sebagai dasar dan ditambah satu variasi di atas 10^6 yaitu $1,5 \times 10^6$. Pengadukan akan dilakukan selama 60 menit. Jika berdasarkan gradien kecepatan, didapatkan gradien sebesar 139 s^{-1} ; 278 s^{-1} ; dan 417 s^{-1} . Setelah dikonversikan ke rpm menghasilkan kecepatan sebesar 100 rpm, 158 rpm, dan 207 rpm.

B. Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan secara *batch* selama 60 menit. Kristal MgCl_2 ditimbang sesuai perbandingan rasio molar yang diinginkan. Kemudian ditambahkan pada *beaker glass* berisi 0,5 L air limbah dengan perbandingan rasio molar yang telah didapatkan dari 3 hasil optimum permodelan. pH diatur dengan menambahkan NaOH 10 N dan 20 N atau H_2SO_4 10 N serta dihomogenasi. Kemudian diaduk menggunakan *jartest* dengan kecepatan berdasarkan variasi kecepatan pengadukan selama 60 menit. Selama pengadukan, pH larutan selalu dijaga dan dicek menggunakan pH-meter. Pengadukan ini dilanjutkan dengan proses sedimentasi selama 30 menit. Parameter yang diuji pada tahap ini adalah pH, kekeruhan, kadar amonium, dan kadar fosfat.

Presipitat hasil presipitasi optimum akan dianalisis morfologi dan strukturnya menggunakan SEM-EDX. Presipitat dipisahkan terlebih dahulu dari supernatannya dengan cara penyaringan menggunakan kertas saring Whatman kemudian dikeringkan pada suhu ruangan selama 48 jam [9]. Pengeringan menggunakan oven dihindari karena dapat menyebabkan perubahan struktur presipitat akibat penguapan ikatan amonium maupun hidrat [11]. Analisis SEM-EDX dilakukan oleh Laboratorium Energi LPPM Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Air Limbah

Penelitian ini menggunakan dua sumber limbah yaitu limbah cair industri pupuk dan limbah cair industri asam fosfat. Limbah industri pupuk merupakan sumber amonium, sedangkan limbah industri asam fosfat merupakan sumber fosfat. Karakteristik limbah cair kedua industri dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Limbah amonium dan fosfat akan dicampur untuk membuat rasio molarnya menjadi 1:1. Limbah amonium yang dicampurkan sebanyak 7,917 Liter untuk menghasilkan *stock* limbah campuran sebanyak 15 Liter. Sedangkan limbah fosfat yang dibutuhkan sebanyak 7,083 Liter. Karakteristik limbah setelah dicampur dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan kadar amonium dan fosfat pada tabel di bawah maka rasio molar $[\text{NH}_4^+] : [\text{PO}_4^{3-}]$ sama dengan 1 : 1,03.

Table 1.
Karakteristik Air Limbah Industri Pupuk

Parameter	Satuan	Nilai
Kekeruhan	NTU	8,3
pH	-	9,7
Amonium	mg/L	5234
Kalsium	mg/L	0,29
Magnesium	mg/L	10,64
COD	mg/L	417,01

Table 2.
Karakteristik Air Limbah Industri Asam Fosfat

Parameter	Satuan	Nilai
Kekeruhan	NTU	1736
pH	-	1,5
Fosfat	mg/L	30875
Kalsium	mg/L	601,19
Magnesium	mg/L	105,33
COD	mg/L	3600
Silika	mg/L	937,79

Table 3.
Karakteristik Air Limbah untuk Proses Pengolahan

Parameter	Satuan	Nilai
Kekeruhan	NTU	858
pH	-	2,5
Fosfat	mg/L	14656
Amonium	mg/L	2864
Kalsium	mg/L	317
Magnesium	mg/L	54,76
COD	mg/L	3675
Fluor	mg/L	679

B. Pemilihan Variabel Penelitian

Berdasarkan hasil permodelan kemudian dipilih pH dan rasio molar dimana *removal* amonium dan fosfat tertinggi. *Removal* amonium tertinggi ada pada rasio molar 1:1:1; 1,5:1:1; dan 2:1:1. Sedangkan *removal* tertinggi pada pH 8,5; 9; dan 9,5. Namun untuk mencapai pH tersebut dibutuhkan penambahan basa yang banyak, sehingga dipilih pH 7,5; 8; dan 8,5 dimana pada pH tersebut memiliki *removal* yang tidak jauh berbeda. saat pH yang akan digunakan pada penelitian ini adalah pH 7,5; 8; dan 8,5. Rasio molar yang akan digunakan pada penelitian ini adalah 1:1:1; 1,5:1:1; dan 2:1:1.

C. Pengaruh Kecepatan Pengadukan

Presipitasi *struvite* terdiri dari dua tahap, yaitu nukleasi dan pertumbuhan kristal. Tahap ini mempengaruhi ukuran partikel [12]. Nukleasi tergantung pada kecepatan pengadukan awal, sedangkan pertumbuhannya tergantung pada energi pengadukan [13]. Pada pH optimum, waktu induksi dipengaruhi oleh proses turbulensi fluida [14]. Waktu induksi berkurang jika kecepatan pengadukan bertambah dan nukleasi *struvite* menjadi cepat.

Berdasarkan Tabel 4, *removal* fosfat dan amonium akan semakin naik seiring dengan naiknya kecepatan pengadukan. Peningkatan *removal* ini sesuai dengan pernyataan [10] pada $G.t_d$ rendah, *removal* efisiensi fosfat akan rendah, sebaliknya jika $G.t_d$ meningkat maka *removal* fosfat akan naik. [15] mengatakan bahwa semakin besar kecepatan pengadukan maka waktu induksi akan semakin menurun dan nukleasi akan terjadi lebih cepat. Namun saat kecepatan pengadukan 207 rpm, *removal* amonium dan fosfat dapat turun karena pada

Table 4.
Hubungan Antara Kecepatan Pengadukan dengan Removal Amonium dan Fosfat

Mixing (rpm)	Removal (%) pada Rasio Molar 1:1:1					
	pH 7,5		pH 8		pH 8.5	
	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄
100	71.06	95.28	76.93	97.48	82.13	98.89
158	67.39	95.25	66.67	97.56	86.14	98.98
207	62.01	95.13	64.62	97.02	78.22	97.71

Mixing (rpm)	Removal (%) pada Rasio Molar 1,5:1:1					
	pH 7,5		pH 8		pH 8.5	
	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄
100	58.34	99.48	69.80	99.94	69.61	93.22
158	56.63	99.85	83.60	99.91	70.98	99.96
207	56.14	99.77	72.35	99.91	75.09	99.98

Mixing (rpm)	Removal (%) pada Rasio Molar 2:1:1					
	pH 7,5		pH 8		pH 8.5	
	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄	NH ₄	PO ₄
100	95.28	76.93	97.48	82.13	98.89	58.34
158	95.25	66.67	97.56	86.14	98.98	56.63
207	95.13	64.62	97.02	78.22	97.71	56.14

pengadukan tinggi, stabilitas kristal *struvite* dapat menurun dan menyebabkan kristal pecah [15].

Sehingga kecepatan pengadukan optimum pada penelitian ini terjadi pada G.td 10⁶ atau setara dengan 158 rpm dengan waktu pengadukan 60 menit. Kecepatan 207 rpm tidak dipilih karena pada kecepatan ini terjadi pemecahan kristal dan menurunkan stabilitas kristal. Selain itu jika kecepatannya semakin besar maka energi listrik yang dibutuhkan semakin besar pula. Kecepatan pengadukan 100 rpm tidak dipilih karena energi yang dibutuhkan untuk pencampuran Mg dalam larutan masih kurang untuk beberapa rasio molar.

D. Pengaruh pH

pH akan mempengaruhi kelarutan *struvite* dan sifat termodinamikanya [16]. pH akan semakin menurun selama presipitasi oleh karena itu pH harus selalu dikontrol. Pengontrolan pH akan menggunakan larutan NaOH 10 N dan 20 N serta akan digunakan H₂SO₄ jika pH-nya terlalu basa.

Penurunan pH disebabkan karena terjadinya induksi. Menurut [17], waktu induksi terjadi pada menit ke 7 – 14. Menurut [18], penurunan pH awal terjadi karena percampuran dan pelarutan Mg. Penurunan pH yang kedua terjadi karena pelepasan proton selama pembentukan *struvite*. Pada penggunaan MgCl₂ juga akan menurunkan pH karena pembentukan *struvite* yang cepat. pH ini akan seimbang kembali saat penambahan NaOH.

Semakin meningkatnya tingkat kejenuhan dan proses pembentukan nukleus maka pH akan semakin menurun. Semakin tinggi pH maka kekeruhan larutan akan semakin besar pula. Pada subbab ini akan membahas tentang pengaruh pH terhadap presipitasi *struvite* dengan kecepatan pengadukan optimum yang telah dipilih pada subbab sebelumnya. Tabel 5 menampilkan hubungan antara *removal* amonium dan fosfat terhadap pH untuk setiap rasio molar dengan kecepatan pengadukan 158 rpm.

Variasi pH dapat mempengaruhi kelarutan atau formasi kristal *struvite* [19]. Kelarutan *struvite* akan berkurang jika pH meningkat. Kelarutan minimum dapat menyebabkan pembentukan kristal *struvite* lebih potensial [20] sehingga *removal* amonium dan fosfat dapat meningkat.

Table 5.
Hubungan Antara pH dengan Removal Amonium dan Fosfat

pH	Removal (%) pada Rasio Molar 1:1:1			
	NH ₄		PO ₄	
	permodelan	penelitian	permodelan	penelitian
7.5	90.28	67.39	95.96	95.25
8	91.70	66.67	97.42	97.56
8.5	92.79	86.14	98.54	98.98

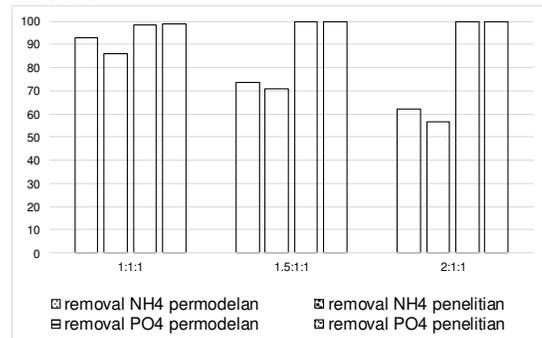
pH	Removal (%) pada Rasio Molar 1,5:1:1			
	NH ₄		PO ₄	
	permodelan	penelitian	permodelan	penelitian
7.5	76.16	56.63	99.93	99.85
8	75.58	83.60	99.98	99.91
8.5	73.74	70.98	99.99	99.96

pH	Removal (%) pada Rasio Molar 2:1:1			
	NH ₄		PO ₄	
	permodelan	penelitian	permodelan	penelitian
7.5	65.60	52.10	99.95	99.90
8	64.77	61.29	99.99	99.98
8.5	62.17	56.40	100.00	99.95

Namun pada pH 8,5 *removal* fosfat dan amonium akan menurun. Penurunan *removal* ini disebabkan karena terbentuknya mineral MgF₂(s). Berdasarkan hasil permodelan pembentukan MgF₂(s) akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pH. Ion fosfat dan amonium akan berkompetisi dengan ion fluor untuk berikatan dengan magnesium. Namun pembentukan MgF₂(s) ini tidak berpengaruh banyak terhadap penurunan *removal* karena MgF₂(s) yang terbentuk tidak sebanding dengan *struvite*. Reaksi pembentukan MgF₂(s) dapat dilihat pada persamaan Reaksi 1.



Penurunan *removal* amonium juga disebabkan karena terbentuknya mineral *bobierite*. [21] menyatakan bahwa kelarutan *bobierite* berkurang ketika pH berubah dari 8 ke 9. *Bobierite* akan menjadi sangat dominan pada pH 8 – 10. Dari penjelasan yang telah dipaparkan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa pH optimum dalam presipitasi *struvite* adalah 8,5. Walaupun pada pH 8,5 ini dapat terbentuk mineral lain selain *struvite*.



Gambar 1 . Pengaruh rasio molar terhadap removal amonium dan fosfat pada pH 8,5 dan kecepatan 158 rpm

E. Pengaruh Rasio Molar

Penambahan magnesium yang berlebih dapat meningkatkan *removal* efisiensi proses, tetapi juga dapat menurunkan kemurnian *struvite* yang terbentuk [22; 9].

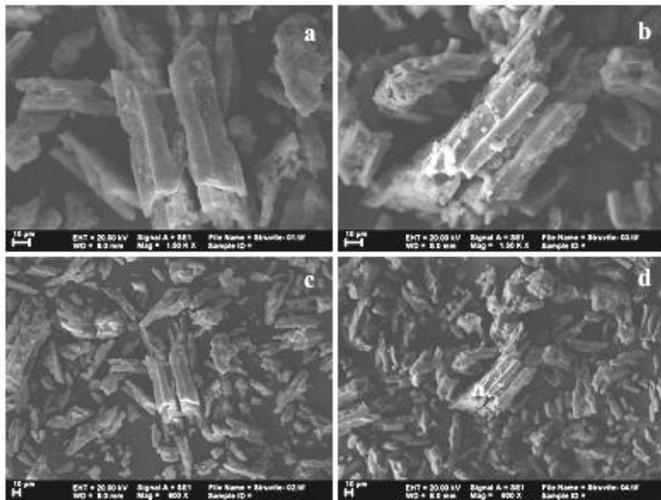
Gambar 1 terlihat bahwa *removal* amonium akan semakin menurun seiring dengan pertambahan rasio molar. Semakin besarnya penambahan Mg pada pH basa dapat menyebabkan terbentuknya *bobierite*. *Bobierite* menyebabkan *removal* amonium semakin menurun karena magnesium hanya akan mengikat fosfat saja. Semakin besar rasio molar Mg maka semakin besar *removal* fosfat. Magnesium mempengaruhi level supersaturasi dan laju proses presipitasi [15]. Tingginya kadar magnesium dapat meningkatkan *removal* fosfat. Pada pH yang diberikan, setiap penambahan rasio molar dapat meningkatkan derajat saturasi pembentukan *struvite*, sehingga mempengaruhi *removal* fosfat [23].

Removal NH₄ penelitian isan
 Removal PO₄ penelitian vite

secara optimum terjadi pada rasio molar [Mg²⁺] : [NH₄⁺] : [PO₄³⁻] sama dengan 1:1:1. Keadaan ini terjadi pada pH 8,5 dan kecepatan pengadukan 158 rpm atau setara dengan G.td 10⁶.

F. Identifikasi Struvite Menggunakan SEM-EDX

Analisis *Scanning electron microscope* (SEM) dan *Energy dispersive X-ray spectroscopy* (EDX) bertujuan untuk



Gambar 2 Bentuk Struvite pada Perbesaran 1500x (a, b) dan 600x (c, d)

Table 6.
 Elemen – elemen pada Presipitat

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
C	6	K-series	25.74	25.74	34.79	8.8
N	7	K-series	0.00	0.00	0.00	0.0
O	8	K-series	42.24	42.24	42.84	13.9
F	9	K-series	13.69	13.69	11.69	5.5
Na	11	K-series	1.22	1.22	0.86	0.1
Mg	12	K-series	6.47	6.47	4.32	0.4
Si	14	K-series	0.45	0.45	0.26	0.0
P	15	K-series	8.84	8.84	4.63	0.4
S	16	K-series	0.65	0.65	0.33	0.1
Ca	20	K-series	0.67	0.67	0.27	0.0
Total :			100.00	100.00	100.00	

identifikasi kristal yang terbentuk. SEM-EDX juga bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia, karakteristik permukaan, serta morfologi dan struktur presipitat. Sampel yang akan dianalisa adalah presipitat hasil optimum, yaitu pada pH 8,5 rasio molar 1:1:1 dan kecepatan pengadukan 158 rpm. Analisis SEM ini dilakukan pada perbesaran 600x dan 1500x.

Kristal *struvite* murni akan memiliki bentuk batang dengan ujung runcing dan pemukaannya bersih dan tanpa cacat [24]. Kristal pada penelitian ini berbentuk batang ujung runcing dan terdapat gumpalan kecil pada permukaannya. Gumpalan tersebut merupakan mineral pengotor yang terbentuk selama proses presipitasi. Mineral tersebut berupa *hydroxyapatite*, *bobierite*, dan MgF₂. Menurut [25], fluor dapat menyebabkan presipitat menjadi cacat dan berukuran kecil. Ion pengotor dapat menghambat laju pertumbuhan karena ion tersebut memblokir bagian pertumbuhan yang aktif, sehingga kristal berukuran kecil. Kehadiran kalsium ini juga akan menyebabkan terganggunya kristalisasi *struvite*, mengurangi ukuran kristal dan menghambat pertumbuhan *struvite* [26].

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 11 terdapat beberapa unsur pada presipitat antara lain Mg, P, O, N, C, F, Na, Ca, Si, dan S. pada Tabel 5, elemen N tidak terbaca karena kemungkinan terjadinya penguapan selama pengeringan presipitat. Unsur tersebut berasal dari limbah, sedangkan unsur Na berasal dari penambahan NaOH saat kontrol pH. Silika (Si) terdapat dalam presipitat karena elemen ini dapat dijadikan inti kristal saat proses nukleisasi [27]. Kadar Flour dalam presipitat memiliki nilai yang cukup tinggi, sehingga fluor ini dapat mengganggu presipitasi *struvite*.

Unsur N dianalisis menggunakan metode *wet-analysis*. *Wet-analysis* dilakukan dengan cara melarutkan presipitat ke dalam 5 ml HNO₃ 1 N kemudian ditambah aquadest hingga 500 ml dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam. Kandungan amonium dalam presipitat mencapai 89,818 mg/gram.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah:

- 1) Kecepatan pengadukan optimum pada penelitian ini terjadi pada kecepatan 158 rpm atau setara dengan G.td 10⁶.
- 2) pH optimum pada penelitian ini terjadi pada pH 8,5.
- 3) Rasio molar optimum pada penelitian ini terjadi pada rasio [Mg²⁺]:[NH₄⁺]:[PO₄³⁻] sama dengan 1:1:1. Hasil residual amonium dari penelitian ini sebesar 396,82 mg/L dan residual fosfat sebesar 148,86 mg/L.

Saran untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

- 1) Diperlukan pengolahan pendahuluan untuk menurunkan kadar Fluor pada limbah. Kehadiran ion ini pada kadar yang tinggi dapat menyebabkan penurunan *removal* amonium dan fosfat.
- 2) Diperlukan pengolahan lanjutan lagi untuk menyisihkan fosfat karena residual fosfat pada penelitian ini masih melebihi baku mutu yang ditetapkan

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing dan Dosen Penguji Tugas Akhir atas bimbingan, saran, dan masukan dalam penulisan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tünay, O., Kabdasli, I. Orhon, D. dan Kolçak, S., "Ammonia removal by magnesium ammonium phosphate in industrial wastewaters" *Wat. Sci. Technol.* (1997) 36 (2-3) : 225-228.
- [2] Zeng, L., dan Li, X., "Nutrient Removal from Anaerobically Digester Cattle Manure by Struvite Precipitation" *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol 5 (2006) Issue 4. P285.
- [3] Münch, von E. dan Barr, K., "Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams" *Water Res.* (2001) 35: 151-9.
- [4] Driver, J., Lijmbach, D., dan Steen, I., "Why Recovery Phosphorus for Recycling and How?" *Environ. Technol.* (1999) 20(7), 651-662.
- [5] Priestley, A.J., Cooney, E., Booker, N.A. dan Fraser, I.H., "Nutrients in Wastewaters-Ecological Problem or Commercial Opportunity" *Proceedings of the 17 th Federal Convention of the Australian Water and Wastewater Association*, Melbourne, (1997) 1. 340-346.
- [6] Gaterell, M.R., Gay, R., Wilson, R., Gochin, R.J. dan Lester, J.N., "An Economic and Environmental Evaluation of the Opportunities for Substituting Phosphorus Recovered From Wastewater Treatment Works in Existing UK Fertiliser Markets" *Env. Tech.* (2000) 21. 1067-1084.
- [7] Khai, N. M. dan Hoang T. Q. T., "Chemical Precipitation of Ammonia and Phosphate from Nam Son Landfill Leachate, Hanoi" *Iranica Journal of Energy & Environment 3 (Special Issue on Environmental Technology)* (2012) 32-36.
- [8] Kumar, R. dan Pal, P., "Turning Hazardous Waste Into ValueAdded Products: Production and Characteristization of Struvite Ammonical Waste with New Approaches" *Journal of Cleaner Production* Vol. 43 (2013), pp: 59-70.
- [9] Warmadewanthi dan Liu, J.C., "Recovery of fosfat and amonium as struvite from semiconductor wastewater" *Separation and Purification technology* (2009) 64(1-3). hal 368-373.
- [10] Kim, D., Kim, J., Ryu, H.-D., dan Lee, S.-I., "Effect of Mixing on Spontaneous Struvite Pecipitation from Semiconductor Wastewater" *Journal of Bioresource Technology* 100 (2009) 74–78.
- [11] Laconi, C.D., Pagano, M., Ramadori, R. dan Lopez, A., "Nitrogen Recovery from A Stabilized Municipal Landfill Leachate" *Journal of Biosource Technology*. Vol. 101 (2010), pp: 1732-1736.
- [12] Doyle, J. D. dan Parsons, S. A., "Struvite Formation, Control and Recovery" *Water Res.* (2002) 36(16), 3925-3940.
- [13] Jones, A. G., "Crystallization Process System. Butterworth" Heinemann : UK (2002).
- [14] Ohlinger, K. N., Young, T. M., dan Schroeder, E. D., "Kinetics effects on preferential struvite accumulation in wastewater" *Journal of Environmental Engineering* (1999) 125(8), 730-737.
- [15] Rahaman, M. S., Ellis, N. dan Mavinic, D.S., "Effects of Various Process Parameters on Struvite Precipitation Kinetics and Subsequent Determination of Rate Constants" *Wat. Sci. tech.* (2008) 57(5), 647 – 654
- [16] Ronteltap, M., Maurer, M., dan Gujer, W. "Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine" *Water Res.* 5, (2007) 977–984.
- [17] Kofina, A.N. dan Koutsoukos, P.G., "Nucleation and growth of struvite from synthetic wastewater" *International Conference on struvite: its role in phosphorus recovery and reuse*, Cranfield : UK (2004).
- [18] Stolzenburg, P., Capdevielle, A., Teychené, S., dan Biscans, B., "Struvite precipitation with MgO as a precursor: Application to wastewater treatment" *Chemical Engineering Science* (2015) 133, 9–15
- [19] Parsons, S.A., Wall F., Doyle, J., Oldring, K., dan Churchley, J., "Assessing the potential for struvite recovery at sewage treatment works" *Environmental Technology*, (2001) 22 (11), 1279-1286
- [20] Escudero, A., Blanco, F., Lacalle, A., dan Pinto, M., "Struvite precipitation for ammonium removal from anaerobically treated effluents" *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3, (2015) 413–419
- [21] Sugiyama, S., Yokoyama, M., Ishizuka, H., Sotowa, K. -I., Tomida, T., dan Shigemoto, N., "Removal of aqueous ammonium with magnesium phosphate obtained from the ammonium-elimination of magnesium ammonium phosphate" *J. Colloid Interface Sci.*, (2005) 2921, 133–138.
- [22] Wang, J., Burken, J.G., dan Zhang, X.Q., "Effect of seeding materials and mixing strength on struvite precipitation" *Water Environment Research* (2006) 78, 125–132.
- [23] Adnan, A., Dastur, M., Mavinic, D.S., dan Koch, F.A.. "Preliminary investigation into factors affecting controlled struvite crystallization at the bench scale" *J. Environ. Eng. Sci.*, (2004) 3, 195-202.
- [24] Suguna, K., Thenmozhi, M., dan Sekar, C., "Growth, spectral, structural and mechanical properties of struvite crystal grown in presence of sodium fluoride" *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 35, (2012) No. 4, pp. 701–706.
- [25] Kabdasli, I., Parson, S. A., dan Tunay, O., "Effect of major ions on induction time of struvite precipitation" *Croatica Chemica Acta* (2006) 79(2). 243-251.
- [26] Corre, K. S. L., Jones, V. E., Hobbs, P., dan Parsons, S. A. "Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity" *Journal of Crystal Growth* 283, (2005) 514–522.
- [27] Yang, L., Zhou, H., dan Moccia, R., "Membrane filtration coupled with chemical precipitation to treat recirculation aquaculture system effluent." *J. Environ. Qual.*, (2006) 356, 2419–2424.