

Kinetika reaksi perolehan fosfat dari pengolahan limbah garam (*bittern*) menjadi *struvite* dengan reaktor vertikal

Kinetics reaction of phosphate recovery from processing of waste salt (*bittern*) into *struvite* using vertical reactor

Anisah D. Ramadhani*, Agung F. Kulianto, Luluk Edahwati

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya – Indonesia

*Email: 17031010094@student.upnjatim.ac.id

Abstrak

Bittern merupakan hasil dari penguapan atau endapan air laut dalam pembuatan garam. *Bittern* ini dapat dimanfaatkan untuk diolah menjadi *struvite* karena pada *bittern* terdapat kandungan Magnesium. Pada penelitian ini, peneliti akan mengkaji mengenai kinetika reaksi perolehan fosfat dari pembentukan *struvite* yang berasal dari limbah garam (*bittern*). Pembentukan *struvite* dilakukan dengan mencampurkan tiga senyawa yaitu Magnesium, Amonium, dan Fosfat (MAP) dengan perbandingan 1:1:1. Alat yang digunakan adalah reaktor vertikal. Larutan MAP dimasukkan ke dalam reaktor dengan variasi suhu dan laju alir umpan. Variasi suhu yang digunakan adalah 25; 30; 35; 40; dan 45°C, sedangkan variasi laju alir umpan yang digunakan adalah 5; 6,25; 8,33; 12,5; dan 25 ml/menit. Kedua variabel dijalankan dengan penambahan KOH. Semua variabel dijalankan sampai mencapai pH 9, dimana pH 9 adalah pH optimum pembentukan *struvite*, dan setelah mencapai pH 9, proses dihentikan. Endapan yang didapat lalu difiltrasi dan dikeringkan, lalu dilakukan analisa endapan dengan metode XRF dan XRD. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, hasil konversi terbaik perolehan senyawa fosfat terdapat pada suhu 25°C dan laju alir 5 ml/menit, yaitu sebesar 18,8%. Reaksi perolehan fosfat dari pengolahan limbah garam (*bittern*) menjadi *struvite* mengikuti reaksi orde-1 dengan nilai R² yang mendekati 1, yaitu sebesar 0,9524 dengan tetapan laju reaksi $1,26 \cdot 10^{-22} \cdot e^{(14125/T)}$, dan energi aktivasi sebesar 117435,25 Joule.

Kata Kunci: *Bittern*, Kinetika Reaksi, Orde Reaksi, Perolehan Fosfat, *Struvite*.

Abstract

Bittern is the result of evaporation or sedimentation of seawater in the manufacture of salt. *Bittern* can be used to be processed into *struvite* because *bittern* contains magnesium. In this study, researchers will examine the kinetics reaction of phosphate recovery from the formation of *struvite* from salt waste (*bittern*). The formation of *struvite* is carried out by mixing three compounds, namely Magnesium, Ammonium, and Phosphate (MAP) with a ratio of 1: 1: 1. The tool used is a vertical reactor. The MAP solution was introduced into the reactor with variations in temperature and feed flow rate. The temperature variations used were 25; 30; 35; 40; and 45°C, while the variation of the feed flow rate used was 5; 6.25; 8.33; 12.5; and 25 ml / minute. Both variables were executed by adding KOH. All variables are run until they reach pH 9, where pH 9 is the optimum pH for *struvite* formation, and after reaching pH 9, the process is stopped. The precipitate obtained is then filtered and dried, then a precipitate analysis is performed using XRF and XRD methods. From the results of the research that has been done, the best conversion results for the acquisition of phosphate compounds are at a temperature of 25°C and a flow rate of 5 ml / minute, which is 18.8%. This study follows the first-order reaction with R² values close to 1, that is equal to 0.9524 by the reaction rate constant $1,26 \cdot 10^{-22} \cdot e^{(14125 / T)}$, and the activation energy of 117,435.25 Joule

Keywords: *Bittern*, Kinetics reaction, Reaction order, Phosphate Recovery, *Struvite*.

1. PENDAHULUAN

Bittern merupakan hasil dari penguapan atau endapan air laut dalam pembuatan garam. Biasanya *bittern* digunakan sebagai bahan bibit untuk membuat garam ulang karena konsentrasi garamnya cukup tinggi, dan sisanya dibuang karena petambak garam tidak tahu akan manfaat dari *bittern* (Manadiyanto dan Arthatiani, 2011). *Bittern* ini dapat dimanfaatkan untuk diolah menjadi *struvite*. *Bittern* memiliki banyak kandungan mineral, diantaranya magnesium klorida ($MgCl_2$), kalium klorida (KCl), magnesium sulfat ($MgSO_4$), natrium klorida (NaCl) dan garam-garam lainnya (Nugraha, dkk., 2018). $MgCl_2$ baik digunakan untuk bahan pembentukan kristal *struvite* karena garam klorida memiliki kelarutan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan senyawa magnesium lainnya seperti MgO dan $Mg(OH)_2$ (Adiman, dkk., 2020).

Struvite adalah zat yang terdiri dari magnesium, ammonium, dan fosfat dalam konsentrasi molar yang sama. Kristal *struvite* memiliki bentuk struktur ortorombik. Proses pembentukannya dipengaruhi oleh derajat keasaman, rasio molar, laju dan waktu aerasi, serta keberadaan ion pengotor (Iswarani dan Warmadewanthi, 2018). *Struvite* dapat menjadi kristal dari suatu larutan dengan pH netral hingga basa (Harrison, dkk., 2011). *Struvite* sendiri secara perlahan dapat larut dalam air. Dikarenakan dapat larut dalam air secara perlahan, maka dapat mencegah pembakaran akar tanaman, bahkan ketika diberikan dalam jumlah yang berlebih. Selain itu dapat mencegah terjadinya eutrofikasi dari saluran air yang dapat membatasi jumlah pencucian ke air tanah sehingga dapat menyediakan pemupukan yang efisien dan ekonomis. Oleh karena itu *struvite* memiliki potensi untuk digunakan sebagai pupuk yang populer di bidang hortikultura, pembibitan, dan lain sebagainya (Ali dan Rajshahi, 2005). Produk *struvite* dapat mengandung 12,65% senyawa fosfor murni, sementara *struvite* yang didapatkan dari hasil pengendapan limbah organik dapat mengandung 6-12% polutan etal. *Struvite* adalah pupuk *multi nutrient* yang rilis secara lambat. *Struvite* dapat membatasi kehilangan fosfor tanah yang biasanya terjadi diakibatkan pupuk buatan yang rilis dengan cepat (Szymanska, dkk., 2019). Presipitasi *struvite* dapat dikontrol dengan mengkombinasi faktor fisika dan kimiawi. Hal ini termasuk temperatur, energi campuran, pH, derajat supersaturasi Mg, NH_4 , dan PO_4^{2-} , dan kehadiran ion-ion yang saling berkompetisi (Hallas, dkk., 2019). Hasil akhir dari proses kristalisasi *struvite* sangat bergantung pada komposisi kimia air limbah. Kotoran yang terkandung dalam limbah dapat mempengaruhi nukleasi *struvite* dan pertumbuhan kristal, bentuk

aglomerasi, serta komposisi dari produk itu sendiri. (Hutnik, dkk., 2016).

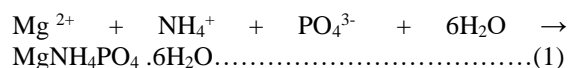
Pada penelitian yang pernah dilakukan (Crutchik dan Garrido, 2016) yang membahas tentang kinetika reaksi dari kristalisasi *struvite* dengan reaktor *batch*, didapat laju reaksi pada suhu $35^\circ C$ dan pada pH 8,8 sebesar $1,54 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^2\text{min}$ dan menghasilkan kinetika reaksi orde 1. Pada penelitian lainnya pula (Edahwati, dkk., 2018) yang membahas tentang kinetika reaksi dari reaksi sintesis dengan reaktor kontinu, didapat laju reaksi pada suhu $30^\circ C$ dan pada pH 9 sebesar 0,00004 sehingga dihasilkan kinetika reaksi orde 1.

Pada penelitian (Prasetyo, dkk., 2015) yang membahas tentang Pengaruh Susunan Reaktor Vertikal dan Horizontal terhadap Penyisihan COD dan TSS Limbah Rumah Pematangan Hewan Menggunakan Biofilter Aerob-anaerob dengan Media Kerikil Hasil Gunung Merapi, diketahui bahwa Reaktor vertikal memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan reaktor Horizontal, hal ini karena luas penampang untuk reaktor vertikal lebih kecil dibandingkan reaktor horizontal yang memungkinkan oksigen bebas lebih sedikit dibandingkan dengan reaktor horizontal, hal ini menyebabkan aliran larutan lebih merata ke dalam reaktor sehingga meningkatkan waktu tinggal larutan di dalam reaktor. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menentukan orde reaksi dan konstanta laju reaksi serta energi aktivasi dari perolahan senyawa fosfat dari Kristal *struvite*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

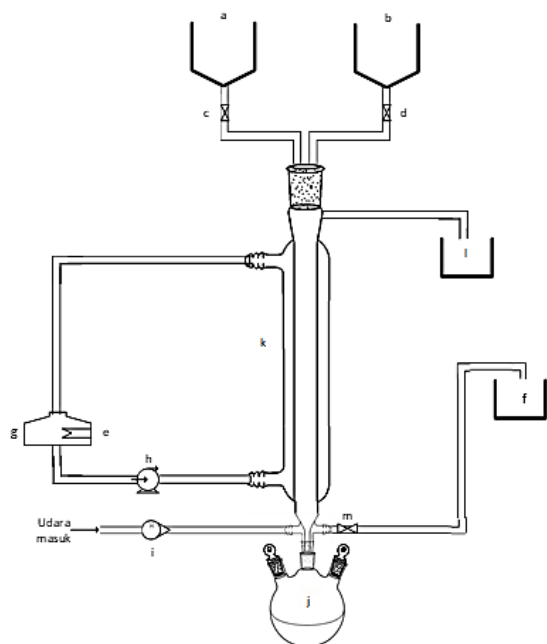
2.1 Bahan

Bittern yang berasal dari Pabrik Garam Manyar, Gresik digunakan sebagai sumber Mg, NH_4OH digunakan sebagai sumber ion NH_4 , H_3PO_4 digunakan sebagai sumber ion PO_4 , dan larutan KOH digunakan sebagai pengatur pH. Dalam larutan lewat jenuh, *struvite* dapat terbentuk oleh reaksi kimia antara Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1) (Ali dan Rajshahi, 2005).



2.2 Prosedur

Proses pembuatan *struvite* adalah dengan dibuat larutan MAP, yakni merupakan campuran dari larutan $MgCl_2:NH_4OH:H_3PO_4$ dengan perbandingan 1:1:1 yang sebelumnya telah diukur pH-nya (bersifat asam). Lalu dibuat larutan KOH 1N, kemudian masing-masing larutan ditampung di dalam tangki penampung. Selanjutnya, rangkaian alat disusun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian alat reaktor vertikal

Keterangan :

- a. Tangki penampung MAP
- b. Tangki penampung KOH
- c. Kran pengatur laju MAP
- d. Kran pengatur laju KOH
- e. Termometer
- f. Tangki penampung larutan keluar
- g. Pemanas air
- h. Pompa air
- i. Rotameter
- j. Tangki penampung endapan
- k. Pemanas jaket
- l. Tangki penampung larutan overflow
- m. Kran pengatur laju larutan keluar

Larutan MAP dimasukkan (*Magnesium Ammonium Phosphate*) dari tangki ke dalam Reaktor Vertikal hingga mencapai ketinggian 3/4 dari reaktor, kemudian dimasukkan kembali larutan MAP sesuai dengan *rate* yang telah dikalibrasi sebelumnya yakni 5; 6,25; 8,33; 12,5; 25 ml/menit serta dimasukkan larutan KOH tetes demi tetes sebagai pemberi suasana basa, sampai pH optimum terbentuknya Kristal *struvite* (pH 9) dicapai. Kompor dinyalakan dan suhu diatur pada suhu operasi yang telah ditentukan dengan menggunakan TC (*temperature control*) sebesar 25, 30, 35, 40, 45°C serta kompresor dinyalakan untuk mengalirkan udara ke dalam reaktor, *rate* udara diatur melalui rotameter menjadi 0,25 liter/menit. Ketika proses berlangsung, pH larutan diukur pada tangki penampung larutan *struvite* secara berkala hingga pH yang diinginkan tercapai. Setelah tercapai pH yang diinginkan, tunggu selama 5 menit sampai pH konstan. Hasil yang diperoleh kemudian disaring menggunakan kertas saring sehingga diperoleh endapan. Endapan dikeringkan

lalu berat endapan dicatat. Setelah itu, pada endapan yang dihasilkan dilakukan analisa XRF dengan alat XRF merk PANalytical tipe Minipal 4 dan XRD dengan alat XRD merk PANalytical tipe X'Pert PRO di Laboratorium Mineral dan Material Maju FMIPA Universitas Negeri Malang (UM).

2.3 Metode Perhitungan

- Konversi Senyawa Fosfat

$$X_A = \frac{\text{Persen berat akhir}}{\text{Persen berat mula-mula}} \dots \dots \dots (2)$$

- Reaksi Orde 1

Dalam penentuan orde satu, reaksi dianggap $A \rightarrow R$, dimana A adalah reaktan fosfat dan R adalah produk *struvite*. Persamaan laju reaksinya adalah seperti pada persamaan (3).

$$-r_A = -\frac{dCA}{dt} = kCA \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan (3) diintegrasikan, sehingga menjadi persamaan (4).

$$-\ln CA + \ln CA_0 = kt \dots \dots \dots (4)$$

Dengan $C_A = C_{A0} (1 - X_A)$, maka persamaan (4) menjadi persamaan (5).

$$-\ln (1-X_A) = kt \dots \dots \dots (5)$$

Plot $-\ln (1-X_A)$ versus t, maka didapat grafik berupa garis lurus dengan slope = k.

- Tetapan Laju Reaksi

$$k = k_0 e^{-E/RT} \dots \dots \dots (6)$$

Dari persamaan (6), plot $\ln k$ versus $1/T$, maka didapat slope = $-E/R$ dan intercept = $\ln k_0$ sehingga didapat energi aktivasi, frekuensi tumbukan, dan tetapan laju reaksi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisa XRF

Hasil penelitian dimana variabel yang dijalankan dalam penelitian ini meliputi suhu (T), laju alir umpan MAP (Q) yang dikalibrasi sebelumnya dari reaksi perolehan fosfat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisa XRF konsentrasi senyawa fosfat (PO_4) pada berbagai suhu dan laju alir umpan

Suhu (°C)	Persen Berat Phosphate				
	Laju Alir Umpan (ml/menit)				
	25	12,5	8,33	6,25	5
25	0,171	0,181	0,184	0,186	0,188
30	0,161	0,168	0,166	0,171	0,171
35	0,152	0,165	0,166	0,167	0,169
40	0,149	0,162	0,159	0,160	0,161
45	0,146	0,159	0,148	0,156	0,160

Pada Tabel 1, diketahui bahwa persen berat fosfat tertinggi berada pada suhu 25°C, persen berat fosfat meningkat pada laju alir umpan 25 ml/menit hingga 5 ml/menit.

3.2 Hasil Perhitungan Konversi Fosfat

Nilai X_A (konversi senyawa fosfat) diperoleh dengan membagi persen berat fosfat hasil XRF dengan persen berat fosfat analisa awal (sebelum terjadi reaksi), dimana persen berat fosfat sebelum terjadi reaksi adalah sebesar 18,8%.

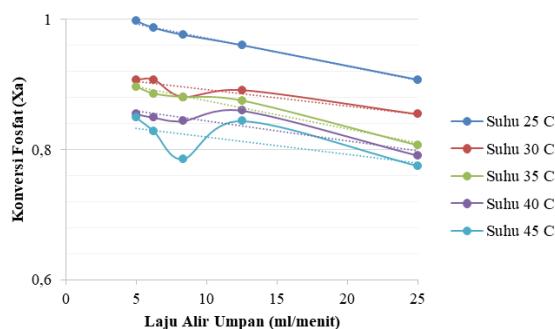
Tabel 2. Hasil perhitungan konversi fosfat (X_A) pada berbagai suhu dan laju alir umpan

Suhu (°C)	Konversi senyawa Fosfat (X_A)				
	Laju Alir Umpan (ml/menit)				
	25	12,5	8,33	6,25	5
25	0,907	0,960	0,976	0,987	0,997
30	0,854	0,891	0,880	0,907	0,907
35	0,806	0,875	0,880	0,886	0,896
40	0,790	0,859	0,843	0,849	0,853
45	0,774	0,843	0,785	0,827	0,849

Pada Tabel 2 ditunjukkan nilai X_A pada berbagai suhu dan laju alir umpan. Konversi senyawa fosfat terbesar berada pada suhu 25°C dengan laju alir umpan 5 ml/menit.

3.3 Hubungan Laju Alir Umpan dan Konversi Fosfat pada Berbagai Suhu

Diperoleh hubungan antara laju alir umpan (Q) dengan konversi senyawa Fosfat (X_A) di dalam *struvite* yang dipengaruhi oleh suhu (T).



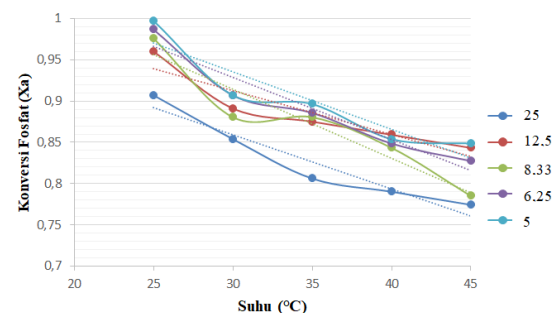
Gambar 2. Hubungan antara laju alir umpan (Q) dengan konversi fosfat (X_A) pada berbagai suhu (T)

Berdasarkan Gambar 2, hasil yang diperoleh yaitu semakin cepat laju alir umpan mengakibatkan konversi fosfat yang dihasilkan semakin sedikit. Konversi yang diperoleh pada suhu 25°C untuk laju alir 5; 6,25; 8,33; 12,5; dan 25 ml/menit adalah 0,997; 0,986; 0,976; 0,960; dan 0,907. Hal ini dikarenakan adanya kontak yang minimal antara umpan dengan larutan KOH seiring bertambah

cepatnya laju alir umpan, sehingga kontak yang terjadi tidak berlangsung lama, pencampuran menjadi kurang baik, dan reaksi pembentukan *struvite* menjadi tidak stabil sehingga senyawa fosfat yang berasal dari larutan MAP tidak terkonversi sempurna menjadi *struvite* (Septiani, dkk., 2020).

3.4 Hubungan Suhu dan Konversi Fosfat pada Berbagai Laju Alir Umpan

Diperoleh hubungan antara suhu (T) dengan konversi fosfat (X_A).

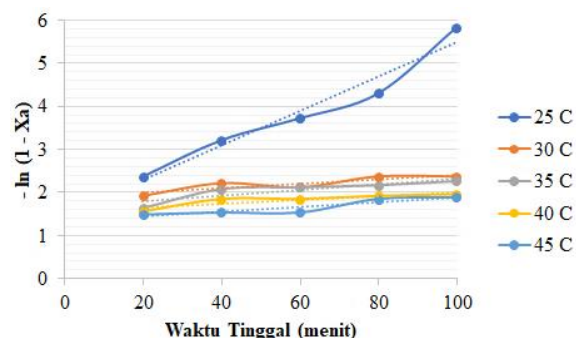


Gambar 3. Hubungan antara suhu (T) dengan konversi fosfat (X_A) pada berbagai laju alir umpan (Q)

Berdasarkan Gambar 3, hasil yang diperoleh yaitu semakin tinggi suhu maka akan mengakibatkan konversi fosfat yang dihasilkan semakin sedikit. Konversi yang diperoleh pada laju alir umpan 5 ml/menit untuk suhu 25; 30; 35; 40; dan 45°C adalah 0,907; 0,854; 0,806; 0,790; dan 0,774. Pada penelitian ini, konversi terbesarnya terbentuk pada suhu 25°C, hal ini dikarenakan hasil kali kelarutan (K_{sp}) dari setiap bahan berbeda-beda, sehingga bahan yang digunakan mempengaruhi suhu optimum terbentuknya *struvite* (Ohlinger, dkk., 1998). Kristal *struvite* terbentuk optimum pada suhu 25-35°C, dan kelarutan senyawa fosfat yang efisien meningkat antara 63-78% ketika suhu meningkat dari 15°C sampai dengan 35°C, pada suhu diatas 35°C kelarutan senyawa fosfat menjadi semakin rendah dan konversi fosfat yang didapatkan juga semakin rendah, dan selain itu, pada suhu diatas 35°C proses persaingan antara ion hydroxyl (OH^-) dengan ion-ion PO_4 akan semakin cepat, hal ini akan mempercepat pula proses pembentukan material baru (*Brucite*) karena pemanasan tersebut (Li, dkk., 2019).

3.5 Penentuan Orde Reaksi

Orde reaksi dapat ditentukan dengan pendekatan orde reaksi. Dari orde 1 ini dicari persamaan garis lurus dengan nilai koefisien regresi linier (R^2) yang mendekati 1 (Levenspiel, 2004).



Gambar 4. Hubungan antara $-\ln(1-X_A)$ dan waktu tinggal (menit) pada masing-masing suhu.

Kinetika reaksi orde 1 telah digunakan di dalam berbagai penelitian mengenai proses pembentukan kristal *struvite* (Nelson, dkk., 2003). Sesuai dengan persamaan (2), dimana terdapat 1 reaktan yang berpengaruh dalam penentuan orde reaksi penelitian ini, yaitu fosfat (Anggriawan, dkk., 2020), berdasarkan Gambar 4, maka dapat diketahui bahwa hubungan antara waktu tinggal (t) dan $-\ln(1-X_A)$ pada suhu 25; 30; 35; 40; dan 45°C menunjukkan sebuah garis lurus dengan nilai koefisien regresi linier (R^2) yang mendekati 1, yaitu sebesar 0,9524; 0,7831; 0,7654; 0,7618; dan 0,8340 sehingga dapat dikatakan bahwa reaksi pembentukan kristal *struvite* dari limbah garam (*bittern*) mengikuti reaksi orde-1 (satu) dengan laju konstanta reaksi 0,0401; 0,04; 0,0033; 0,0067; dan 0,0035/menit (Levenspiel, 2004). Hasil yang sama juga didapatkan dari beberapa penelitian sebelumnya (Quintana, dkk., 2005) (Rahaman, dkk., 2008) yang membahas mengenai kinetika reaksi pembentukan *struvite*, dimana pembentukan *struvite* mengikuti reaksi orde 1.

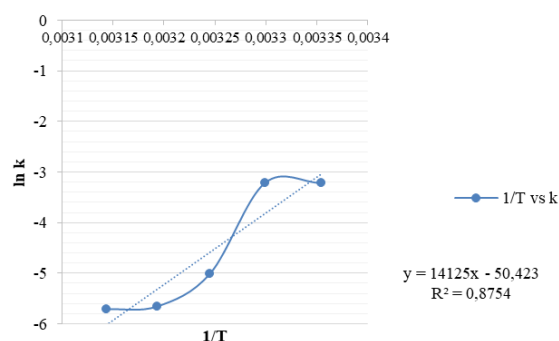
3.6 Penentuan Tetapan Laju Reaksi dan Energi Aktivasi

Diketahui nilai k dan $\ln k$ seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data perhitungan konstanta reaksi (k) dan $\ln k$

Suhu (°C)	Suhu (K)	1/T	K	$\ln k$
25	298,15	0,00335	0,0401	-3,216
30	303,15	0,0033	0,04	-3,219
35	312,15	0,00325	0,0067	-5,006
40	313,15	0,00319	0,0035	-5,655
45	318,15	0,00314	0,0033	-5,714

Berdasarkan Tabel 3, maka dapat dibuat grafik hubungan antara ($\ln k$) dengan $1/T$, dimana slope yang dihasilkan merupakan harga $(-E/R)$ berdasarkan persamaan Arrhenius.



Gambar 5. Hubungan antara $1/T$ dengan $\ln k$

Pada Gambar 5 menjelaskan tentang hubungan antara $1/T$ dengan $\ln k$, yang mana diperoleh persamaan garis lurus seperti yang ditunjukkan pada persamaan (7).

$$Y = 14125x - 50,423 \dots \dots \dots (7)$$

Berdasarkan persamaan garis lurus $y = mx + c$, dimana m adalah slope dan c adalah intersept, maka slope yang dihasilkan pada gambar 5 adalah : $m = 14125$. Sedangkan intersept yang dihasilkan adalah : $c = -50,423$.

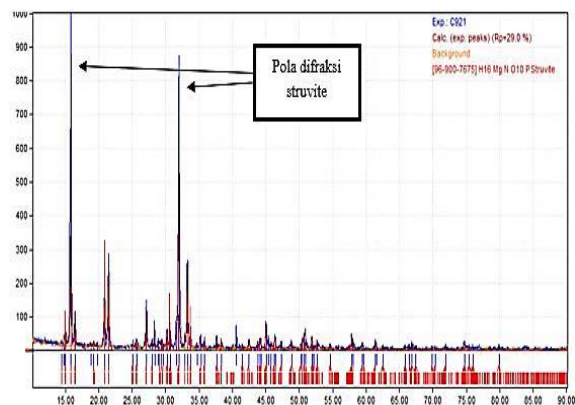
Menurut persamaan Arrhenius (Levenspiel, 2004), $\text{slope} = -E/R$, dimana E adalah energi aktivasi dan R adalah konstanta hukum gas ideal dengan nilai 8,314 J/mol.K, sehingga energi aktivasi (E) diperoleh sebesar 117435,25 Joule sedangkan untuk intersept, $\ln k_0$ dimana k_0 adalah frekuensi tumbukan, sehingga frekuensi tumbukan (k_0) diperoleh sebesar $1,26 \cdot 10^{-22}$.

Sehingga persamaan tetapan laju reaksi dengan mengikuti persamaan Arrhenius adalah sebagai berikut :

$$k = 1,26 \cdot 10^{-22} \cdot e^{(14125/T)} \dots \dots \dots (8)$$

3.7 Hasil Analisa XRD

Hasil analisa dengan metode XRD dalam keadaan optimum, yakni pada suhu 25°C dan laju alir umpan 6,25 ml/menit ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil analisa dengan metode XRD

Dari Gambar 6, dapat dijelaskan bahwa material *struvite* telah terbentuk yang dibuktikan dengan adanya puncak grafik yang berwarna merah (pola difraksi *struvite*), serta puncak grafik yang berwarna biru adalah pola difraksi dari endapan yang dianalisa.

4. KESIMPULAN

Pembentukan *struvite* dari pengolahan limbah garam (*bittern*) dengan reaktor vertikal pada suhu optimal 25°C mengikuti reaksi orde-1 dengan nilai R^2 yang mendekati 1, yaitu sebesar 0,9524 dengan tetapan laju reaksi $1,26 \cdot 10^{-22} \cdot e^{(14125/T)}$, serta energi aktivasi *struvite* sebesar 117435,25 Joule.

NOTASI

X_A	= Konversi Senyawa Fospat
t	= Waktu Tinggal (menit)
k	= Tetapan Laju Reaksi
k_0	= Frekuensi Tumbukan
E	= Energi Aktivasi (Joule)
R	= Tetapan Gas Ideal (8,314 J/mol.k, atau 1,982 kal/mol.K)
T	= Suhu (Kelvin)

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur sebagai pihak yang memberikan bimbingan dan arahan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiman, T.M.F., Feriyanto, A., Sutiyono, Edahwati, L., 2020. Mineral *struvite* dari batuan dolomit dengan reaktor kolom sekat. *J. Teknik Kimia*, 14(2): 85-91.
- Ali, M.I., Rajshahi, 2005. *Struvite crystallization from nutrient rich wastewater. PhD Dissertation*, School of Engineering, James Cook University.
- Anggriawan, R.R., Alvira, F.H., Edahwati, L., 2020. Reaction kinetics of ammonium removal from cow urine by *struvite* formation using a baffle column reactor. *J. Teknik Kimia*, 7(2): 99-105. <https://dx.doi.org/10.26555/chemica.v7i2.18209>.
- Crutchik, D., Garrido, J.M., 2016. Kinetics of the reversible reaction of *struvite* crystallisation. *Chemosphere J.*, 154: 567-572. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere/2016.03.134>.
- Edahwati, L., Sutiyono, S., Muryanto, S., Jumari, J., Bayuseno, A.P., 2018. Kinetics analysis of synthesis reaction of *struvite* with air-flow

continous vertical reactors, *IOP Conf. Ser. J. of Physics*, vol. 953, doi:10.1088/1742-6596/953/1/012245.

- Hallas, J.F., Mackowiak, C.L., Wilkie, A.C., Harris, W.G., 2019. *Struvite phosphorus recovery from aerobically digested municipal wastewater. Sustainability J.*, 11(2): 1-12. doi:10.3390/su11020376.
- Harrison, M.L., Johns, M.R., White, E.T., 2011. Growth rate kinetics for *struvite* crystallisation. *Chemical Engineering Transactions*, 25: 309-314.
- Hutnik, N., Wierzbowska, B., Piotrowski, K., Matynia, A., 2016. Effect of continous crystallizer performance on *struvite* crystals produced in reaction crystallization from solutions containing phosphate (V) and zinc (II) Ions. *Brazilian J. of Chem. Eng.*, 33(2): 307-317.
- Iswarani, W.P., Warmadewanthi, I.D.A.A., 2018. Recovery fosfat dan amonium menggunakan teknik presipitasi *struvite*. *J. Teknik ITS*, 7(1): 183-185.
- Manadiyanto, Arthatiani, F.Y., 2011. Pemanfaatan limbah pembuatan garam sebagai upaya peningkatan pendapatan petambak garam di Pulau Madura. *J. Pertanian Universitas Trunojoyo*.
- Levenspiel, O., 2004. *Chemical reaction engineering*, third ed. John Wiley & Sons, New York.
- Li, B., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, H.M., Munir, T., Wang, G.Q., Young, B.R., 2019. Phosphorus recovery through *struvite* crystallization: challenges for future design. *Science of the Total Environment J.*, 648: 1244-1256, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.166>.
- Nelson, N.O., Mikkelsen, R.L., Hesterberg, D.L., 2003. *Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of ph and mg:p ratio and determine of rate constant. Bioresource Technology J.*, 89(3): 229-236. doi:10.1016/S0960-8524(03)00076-2.
- Nugraha, K.A., Wesen, P., Mirwan, M., 2018. Pemanfaatan *bittern* sebagai koagulan alternatif pengolahan limbah tepung ikan. *J. Ilmiah Teknik Lingkungan*, 8(1): 1-9.
- Ohlinger, K.N., Young, T.M., Schroeder, E.D., 1998. Predicting *struvite* formation in digestion. *Water Research J.*, 32(12): 3607-3614.

- Prasetyo, B., Sutrisno, E., Sumiyati, S., 2015. Pengaruh susunan reaktor vertikal dan horizontal terhadap penyisihan cod dan tss limbah rumah pemotongan hewan menggunakan biofilter aerob-anaerob dengan media kerikil hasil Gunung Merapi. *J. Teknik Lingkungan*, 4(2).
- Quintana, M., Sanchez, E., Colmenarejo, M.F., Barrera, J., Garcia, G., Borja, R., 2005. Kinetics of phosphorus removal and struvite formation by the utilization of by-product of magnesium oxide production. *Chem. Eng. J.*, 111(1): 45-52. doi:10.1016/j.cej.2005.05.005.
- Rahaman, M.S., Ellis, N., Mavinic, D.S., 2008. Effects of various process parameters on struvite precipitation kinetics and subsequent determination of rate constants. *Water Sci. and Tech. J.*, 57(5): 647-654.
- Septiani, H., Zahra, N., Sutiyono, Edahwati, L., 2020. Pengolahan bittern sebagai pembentuk pupuk struvite menggunakan reaktor sekat secara sinambung. *J. Metalurgi dan Material Indonesia (JMMI)*, 3(1): 1-7.
- Szymanska, M., Szara, E., Was, A., Sosulski, T., Van Pruissen, G.W.P., Cornelissen, R.L., 2019. Struvite-an innovative fertilizer from anaerobic digestate produced in a bio-refinery. *Energies J.*, 12(2): 1-9. doi:10.3390/en12020296.