

PELINDIAN URANIUM PADA BATUAN  
FOSFAT AFRIKA BARAT DENGAN  
BAKTERI *T. Ferrooxidans* F 402

E. Suwadi\*, F. Suhadi\*,  
K. Affandi\*\*, T. Herjati\*\*, dan  
T. Hud\*\*

PELINDIAN URANIUM PADA BATUAN FOSFAT AFRIKA BARAT DENGAN BAKTERI *Thoibacillus Ferrooxidans* F 402

E. Suwadi\*, F. Suhadi\*, K. Affandi\*\*, T. Herjati\*\*, dan T. Hud\*\*

ABSTRAK

PELINDIAN URANIUM PADA BATUAN FOSFAT AFRIKA BARAT DENGAN BAKTERI *Thoibacillus Ferrooxidans* F 402. Telah dilakukan percobaan pelindian uranium pada batuan fosfat tipe M dan Y secara laboratorium. Percobaan dilakukan dalam 6 seri dengan perlakuan penyesuaian nilai keasaman pada pH 2,5, media pelarut yang terdiri atas larutan encer  $H_2SO_4$  dan larutan 9 K (Silverman), dengan pemberian inoculum bakteri *T. ferrooxidans* F 402 dengan kepadatan  $9 \times 10^3$  sel bakteri/ml. Parameter pelindian yang diamati ialah pertumbuhan bakteri yang dapat dilihat dari perubahan  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  larutan dan potensial redoksi, perubahan pH, dan kadar U terlarut. Hasil percobaan menunjukkan bakteri masih tahan hidup dalam larutan alkalis batuan fosfat, dan bakteri mampu tumbuh dan berkembang dalam larutan 9 K (Silverman). Kadar U terlarut sangat rendah terutama pada perlakuan medium  $H_2SO_4$ , ber-turut-turut  $< 0,05$  ppm dalam larutan  $H_2SO_4$  pH 2,5 dibanding  $< 0,1$  ppm dalam larutan 9K.

ABSTRACT

BACTERIAL LEACHING OF WEST AFRICA ROCK PHOSPHATE USING *Thoibacillus Ferrooxidans* F 402. Bacterial leaching of type M and Y rock phosphate were carried out as laboratory experiment. Experiments were run in batches of 6 series. The treatments of the experiment consisted of acidity adjustment in pH 2,5, 2 medium of growth solutions i.e. 9 K (Silverman) medium and sulfuric acid solution of pH 2,5. *T. ferrooxidans* F 402 was added with density of  $9 \times 10^3$  bacteria cell/ml. Some leaching parameters was observed to study bacterial growth as changes in  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  as well as redox potential, pH, and soluble concentration of U. Results of the experiments showed that

---

\* Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN

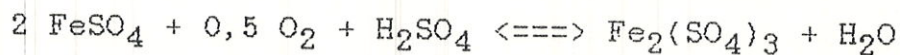
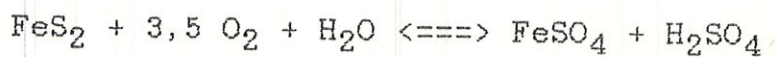
\*\* Pusat Penelitian Bahan Galian Nuklir, BATAN

bacteria was maintaining latent growth in alkaline rock phosphate solution, while bacteria performed well growth and developed in 9 K solution. U concentration in solution of  $H_2SO_4$  pH 2,5 as growth medium was less than that of in 9 K (Silverman) medium, <0,05 ppm and <0,1 ppm respectively.

## PENDAHULUAN

Umumnya setiap pelindian uranium dari batuan yang menggunakan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* akan cukup berhasil apabila batuan tersebut mengandung mineral yang dapat menghasilkan reaksi asam, sehingga suasana larutan yang ditimbulkannya akan bersifat asam (1). Keadaan ini akan membantu proses pelindian uranium dengan bakteri, karena dalam suasana asam bakteri akan tumbuh paling optimal yaitu antara pH 1,8-3,0 (2).

Beberapa jenis batuan dapat merupakan medium pertumbuhan yang kurang memuaskan bagi *T. ferrooxidans*. Batuan tersebut umumnya tidak mengandung senyawa sulfida, mengandung karbonat tinggi, mengandung bahan organik, dan tidak mengandung besi (3). Seperti diketahui senyawa besi dan sulfida akan diperlukan oleh bakteri untuk pertumbuhannya, sesuai dengan reaksi :



di mana tenaga yang dikeluarkan pada oksidasi  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  akan digunakan oleh bakteri untuk keperluan hidupnya (2).

Pada beberapa jenis batuan uranium, pH adalah alkalis. Hal ini dapat disebabkan oleh kandungan karbonat, natrium, atau oleh karena adanya air perendaman yang menggenangi batuan uranium tersebut (4). Khususnya bekas penambangan batu bara yang diduga mengandung uranium, pH batuan dapat berubah dari sedikit alkalis menjadi asam, hal ini disebabkan karena batuan mengandung pirit ( $\text{FeS}_2$ ) (5).

Batuan fosfat asal Afrika Barat, sebagian besar mengandung  $\text{CaO}$  (51,7%), sedangkan unsur yang dianggap mendukung pertumbuhan bakteri seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{SO}_3$  masing-masing hanya 0,3 % dan 1,50 %. Untuk tujuan pelindian, perlu dilakukan penambahan asam penambahan asam agar supaya kondisi pelindian cukup memuaskan bagi pertumbuhan bakteri.

Pada percobaan ini diamati perubahan nilai keasaman (pH) pada pertumbuhan bakteri, perubahan nilai  $\text{Fe}^{2+}$ , dan nilai potensial redoksi, dan kadar uranium yang terlarut, dengan tujuan untuk memperoleh hasil pelindian uranium yang efisien sehingga cukup layak untuk dilaksanakan secara ekonomis.

#### **BAHAN DAN METODE**

*Bahan.* Bahan percobaan terdiri atas batuan fosfat berasal dari Afrika Barat tipe Y dan M. Sifat karakteristik batuan fosfat terlihat pada Tabel 1. Medium 9 K untuk

pertumbuhan bakteri terdiri atas  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  3,0 g, KCl 0,1 g,  $\text{K}_2\text{PO}_4$  0,5 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0,5 g,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0,01 g, dan  $\text{FeSO}_4$  10 g dalam 1 liter  $\text{H}_2\text{O}$ . Bakteri *T. ferrooxidans* F 402 berasal dari Kalimantan yang telah diisolasi. Pemberian bakteri ke dalam gelas erlenmeyer 250 ml ditambahkan pada kepadatan  $9 \times 10^3$  sel/ml. Penetapan pH dilakukan dengan pH meter Fischer model 610, sedangkan penetapan potensial redoksi (Eh) dilakukan dengan pH meter yang sama dengan menggunakan elektroda Eh. Oleh karena U terlalu rendah penetapan U dilakukan dengan cara fluorometri (6). Penetapan  $\text{Fe}^{2+}$  dilakukan dengan menggunakan kertas penguji dari Merck No. 10004 atau dengan cara Ortofenontralin.

*Metode.* Pada percobaan ini diamati perlakuan utama dan sub perlakuan. Sebagai perlakuan utama ialah perbedaan pH pada medium pertumbuhan bakteri sebagai larutan pelindi. Sedangkan pada sub perlakuan 1, diberikan jenis larutan atau medium pelindi. Sebagai sub perlakuan 2, ialah jenis batuan.

Pada perlakuan umumnya telah dilakukan urutan tata kerja sebagai berikut:

- a. Sebanyak 100 gram batuan (<100 mesh) tipe M dan Y, dimasukkan ke dalam 200 ml larutan dalam 250 ml gelas erlenmeyer.
- b. Keasaman larutan pelindi disesuaikan pada pH 2,5 se-

dangkan perlakuan yang lain pH tidak disesuaikan. Penyesuaian pH 2,5 dilakukan dengan penambahan  $H_2SO_4$  2,5% (4N). Penyesuaian pH dilakukan setiap 3 hari selama 5 minggu masa inkubasi pertumbuhan bakteri. Pada perlakuan tanpa penyesuaian keasaman, larutan mencapai pH 6,0.

c. Seluruh seri perlakuan terdiri atas :

**Percobaan dengan penyesuaian pH.**

Percobaan seri 1. Pelindian U pada batuan tipe M dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 dalam medium 9 K.

Percobaan seri 2. Pelindian U pada batuan tipe Y dengan *T. ferrooxidans* F 402 dalam larutan 9 K.

Percobaan seri 3. Pelindian U pada batuan tipe M dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 dalam larutan  $H_2SO_4$ .

Percobaan seri 4. Pelindian U pada batuan tipe Y dengan bakteri *T. ferrooxidans* dalam larutan  $H_2SO_4$ .

**Percobaan tanpa penyesuaian pH.**

Percobaan seri 5. Pelindian U pada batuan tipe M dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402, dalam larutan  $H_2SO_4$ .

Percobaan seri 6. Pelindian U pada batuan tipe Y dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402, dalam larutan  $H_2SO_4$ .

Masing-masing perlakuan diulang 4 kali.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

*Pelindian dengan Pengaturan pH.*

1. Hasil pelindian pada batuan tipe M

Hasil percobaan seri 1 terlihat pada Tabel 2. Pelarutan U oleh bakteri dalam medium 9 K ialah < 0,1 ppm. Bakteri masih mampu tumbuh karena diberikan penyesuaian pH pada kisaran 2,0 - 3,0, dimana pada pH tersebut perkembangan bakteri akan menunjukkan pertumbuhan yang paling baik. Pada percobaan seri 3 terlihat hasil pelindian U yaitu < 0,5 ppm, seperti pada Tabel 4.

2. Hasil pelindian pada batuan tipe Y

Hasil percobaan seri 2 terlihat pada Tabel 3. Pelarutan U oleh bakteri dalam medium 9 K ialah < 0,1 ppm. Bakteri masih mampu tumbuh karena diberikan penyesuaian pH pada kisaran 2,0-3,0. Pada percobaan seri 4 hasil pelindian U yaitu < 0,5 ppm seperti pada Tabel 5.

Pada perlakuan dengan penyesuaian pH 2,5, penambahan  $H_2SO_4$  ke dalam larutan berturut-turut adalah 1,7 g; 1,9 g; 2,1 g dan 1,9 g (Tabel 2,3,4,5). Penyesuaian pH 2,5 ialah untuk memperoleh nilai keasaman yang paling baik untuk pertumbuhan bakteri *T. ferrooxidans* F 402. Pertumbuhan bakteri dalam medium 9 K terlihat lebih baik seperti terlihat pada hasil pelindian yang lebih tinggi yaitu < 0,1 ppm dibanding pertumbuhan bakteri dalam medium  $H_2SO_4$  yaitu 0,05 ppm, seperti terlihat pada Gambar 1,2,3,4.

Pertumbuhan bakteri terlihat lebih baik dalam medium 9 K yaitu dengan diperolehnya nilai potensial redoksi 460 mV dan 473 mV (Tabel 2,3,9) dibanding hanya 415 mV dan 420 mV dalam medium  $H_2SO_4$  (Tabel 4,5,9).

#### Pelindian Tanpa Penyesuaian pH

##### 1. Hasil pelindian pada batuan tipe batuan M

Hasil pelindian U (pada percobaan seri 5) dalam larutan ialah  $< 0,05$  ppm, sedangkan pH mencapai sekitar 6,0. Potensial redoksi 400-435 mV, dengan kadar  $Fe^{2+}$  larutan 50-100 ppm (Tabel 6,9 dan Gambar 5). Tidak terlihat adanya pertumbuhan bakteri.

##### 2. Hasil pelindian pada batuan tipe Y

Hasil pelindian U (pada percobaan seri 6) dalam larutan ialah  $< 0,05$  ppm. Nilai keasaman (pH) sekitar 6,0 dan potensial redoksi, yang menggambarkan kurang aktifnya pertumbuhan bakteri, ialah 390-425 mV, dengan kadar  $Fe^{2+}$  larutan 50-100 ppm (Tabel 7,9 dan Gambar 6).

Tanpa penyesuaian pH, nilai keasaman larutan pada kedua batuan akan naik kembali menjadi 6,0, keadaan ini disebabkan batuan tipe M dan Y mempunyai pH dasar yang alkalis yaitu 8,0 seperti terlihat pada Tabel 1. Pada kedua tipe batuan juga dapat dilihat kadar  $Fe^{2+}$  larutan tidak habis teroksidasi (Tabel 8) selain potensial redoksi



hanya mencapai 420 mV (Tabel 9). Oleh karena itu sukar diharapkan terjadinya perkembang biakan bakteri dalam suasana seperti tersebut.

Berdasarkan percobaan di atas dapat diamati bahwa pengaruh penyesuaian pH sangat baik untuk perkembang biakan bakteri. Pada penggunaan medium 9 K ternyata hasil pelindian menunjukkan harga lebih tinggi ( $<0,1$  ppm) dibanding penggunaan medium  $H_2SO_4$  pH 2,5 yang hanya  $< 0,05$  ppm. Dapat dilihat juga pada jumlah dan kepadatan bakteri dalam larutan (Tabel 2 s.d. 7). Hal ini dapat disebabkan oleh adanya nutrisi bakteri di dalam medium 9 K yang memungkinkan bakteri tumbuh dengan baik. Pada percobaan dengan larutan tanpa penyesuaian pH kehidupan bakteri sama terhambatnya seperti pada penggunaan medium  $H_2SO_4$  pH 2,0 meskipun dilakukan penyesuaian pH.

Dari percobaan ini juga ternyata bahwa penggunaan medium  $H_2SO_4$  kurang efektif untuk pelindian U pada batuan M dan Y meskipun telah dilakukan penyesuaian pH. Hal ini mungkin dikarenakan terbatasnya unsur nutrisi yang terlarut untuk pertumbuhan bakteri, dalam hal ini terutama unsur nitrogen, seperti terlihat pada Tabel 1. Hasil kelarutan U yang sangat rendah dapat disebabkan selain kandungan total batuan yang rendah ( $<80$  ppm), juga oleh sifat batumannya yang alkalis. Bakteri dapat berkembang dengan baik pada medium  $H_2SO_4$  dengan penyesuaian pH apabila dibe-

rikan tambahan nutrisi yang sesuai untuk pertumbuhannya, meskipun tidak selengkap unsur-unsur pada medium 9 K. Dengan pelindian yang murah tetapi hasil pelarutan U yang tinggi dapat diharapkan pemanfaatan limbah batuan uranium dengan kadarnya yang sangat rendah sehingga menjadi lebih ekonomis (4).

Batuan dengan pH dasar yang alkalis akan kurang memuaskan pada pelindian U dengan bakteri. Hal ini disebabkan oleh terganggunya pertumbuhan bakteri akibat pH yang alkalis, dan kadar  $Fe^{2+}$  yang rendah, sehingga mengurangi nilai tambah pada proses pelindian U (7). Pada beberapa batuan dengan pH yang cukup alkalis, ternyata percobaan ROBERT dkk. (8) menunjukkan hasil yang cukup baik. Keadaan ini disebabkan oleh adanya penyesuaian pertumbuhan bakteri dalam lingkungannya yang sudah mengalami perubahan tersebut. Perubahan tersebut dapat merupakan mutasi dibanding adaptasi (7).

Pada percobaan ini perubahan pH selalu terjadi pada kedua tipe batuan M dan Y, oleh karena itu penambahan  $H_2SO_4$  yang terus menerus akan menambah biaya pelindian.

#### KESIMPULAN

Dari percobaan pelindian U pada batuan fosfat ini, dapat disimpulkan bahwa bakteri *T. ferrooxidans* masih tumbuh aktif dan berkembang pada batuan fosfat tipe M dan

Y pada perlakuan pemberian medium 9 K. Pada perlakuan pemberian larutan  $H_2SO_4$  baik dengan penyesuaian ataupun tanpa penyesuaian pH 2,5 bakteri tidak berkembang dengan baik meskipun masih tetap hidup di dalam larutannya. Perkembangan hidup bakteri di dalam medium 9 K dapat membantu pelindian U dari batuan dengan lebih baik ( $<0,1$  ppm) dibanding perkembangan hidup bakteri yang terhambat di dalam medium  $H_2SO_4$  ( $<0,05$  ppm). Hasil kelarutan  $U^{6+}$  yang rendah dapat disebabkan oleh kadar U batuan yang rendah ( $<80$  ppm) selain pH batuan yang alkalis.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. BRUYNSTEIN, A., VISYOLYI, A., and WALDEN, C.C., "Effect of pH and Eh on the chemical and biological leaching of low grade U ore", Use of Microorganisms in Hydrometallurgy (Proc. Conf. Hungary) Hungarian Acad. of Sci. (1980) 85.
2. SILVERMAN, M.P., and LUNDGREN, D.G., On the chemoautotrophic iron bacterium *T. ferrooxidans*, J. Bacteriol. 77 (1959) 642.
3. TORMA, A.E., and BOSECKER, K., Bacterial Leaching Progress in Industrial Microbiology, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, 17 (1981).
4. CZAKO', V.K., CZEGLE'DI, B., FEKETE, L., and KECSK'ES, M., "Bacterial investigations of sodic uranium leaching processes". Use of Microorganisms in Hydrometallurgy (Proc. Conf. Hungary, 1980), Hungarian Acad. of Sci. (1980) 39.
5. CORRANS, I.J., HARRIS, B., and RALPH, B.J., Bacterial leaching: An introduction to its application and theory and a study of its mechanism of operation. Journ. of the South African Institute of Mining and Metallurgy 72 8 (1972) 221.

6. PRICE, G.R., FERRETI, R.J., and SAMUEL SCHATZ., Fluorophotometric determination of uranium, *Anal. Chem.* 25 (1953).
7. BRUYNSTEIN, A., VISZOLI, A., VOS, R., "The Ability of *Thiobacillus ferroxidans* to Withstands Changes in pH", Use of Microorganisms in Hydrometallurgy (Proc. Conf. Hungary, 1980), Hungarian, Acad. of. Sci. (1980) 150.
8. ROBERT, L., KLEINMANN, P., CRERA, D.A., *Thiobacillus ferroxidans* and the formation of acidity in simulated coal mine environments, *Geomicrobiology Journal* 1, 4 (1979) 373.

Tabel 1. Kandungan total unsur (%) batuan fosfat tipe M dan Y

No.	Unsur	Batuan fosfat tipe	
		M	Y
1	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34,0	38,2
2	CaO	51,7	52,2
3	SiO <sub>2</sub>	2,45	1,87
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30	0,42
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38	0,35
6	MgO	0,40	0,43
7	P	4,04	4,07
8	SO <sub>3</sub>	1,50	1,42
9	CO <sub>2</sub>	3,75	4,0
10	Na <sub>2</sub> O	0,70	0,58

Tabel 2. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe M dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH ± 2,5\*, dalam medium 9 K

No.	Penambahan H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar Fe <sup>2+</sup> (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar U <sup>6+</sup> (ppm)
1	0,3±0,017	3,0±0,12	470±15,8	100±6,5	0	++	< 0,1
2	0,3±0,02	2,8±0,08	465±14,7	70±4,2	1	++	< 0,1
3	0,3±0,015	3,0±0,12	450±19,8	70±5,6	2	++	< td
4	0,3±0,02	2,5±0,08	450±20,5	50±4,5	3	++	< 0,05
5	0,5±0,018	2,5±0,07	460±22,4	50±4,3	4	++	< 0,1
6	-	2,7±0,08	470±18,6	30±2,8	5	++	< 0,1

td-tidak terditeksi

\* Penyesuaian pH dilakukan setiap 3 hari selama 5 minggu

Tabel 3. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe Y dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH  $\pm$  2,5, dalam medium 9K

No.	Penambahan $H_2SO_4$ (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar $Fe^{2+}$ (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar $U^{6+}$ (ppm)
1	0,3 $\pm$ 0,018	2,8 $\pm$ 0,05	450 $\pm$ 19,0	100 $\pm$ 7,3	0	++	<0,1
2	0,5 $\pm$ 0,018	3,0 $\pm$ 0,04	440 $\pm$ 20,2	90 $\pm$ 4,5	1	++	<0,1
3	0,3 $\pm$ 0,02	2,7 $\pm$ 0,07	460 $\pm$ 16,8	85 $\pm$ 6,7	2	++	<0,1
4	0,3 $\pm$ 0,016	2,5 $\pm$ 0,05	470 $\pm$ 17,5	60 $\pm$ 4,9	3	++	td
5	0,5 $\pm$ 0,02	3,0 $\pm$ 0,09	470 $\pm$ 18,6	50 $\pm$ 4,2	4	++	td
6	-	2,5 $\pm$ 0,08	480 $\pm$ 17,8	25 $\pm$ 1,6	5	++	<0,1

td - tidak terdeteksi

Tabel 4. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe M dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH  $\pm$  2,5 dalam larutan  $H_2SO_4$

No.	Penambahan $H_2SO_4$ (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar $Fe^{2+}$ (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar $U^{6+}$ (ppm)
1	0,5 $\pm$ 0,02	2,5 $\pm$ 0,08	450 $\pm$ 18,6	100 $\pm$ 5,8	0	+	<0,05
2	0,5 $\pm$ 0,015	2,8 $\pm$ 0,07	435 $\pm$ 22,4	70 $\pm$ 4,2	1	+	<0,05
3	0,3 $\pm$ 0,016	3,0 $\pm$ 0,06	460 $\pm$ 20,2	50 $\pm$ 3,8	2	+	td
4	0,3 $\pm$ 0,018	3,0 $\pm$ 0,05	440 $\pm$ 14,6	50 $\pm$ 4,2	3	+	td
5	0,5 $\pm$ 0,02	2,4 $\pm$ 0,07	420 $\pm$ 20,2	50 $\pm$ 4,0	4	+	<0,05
6	-	2,7 $\pm$ 0,08	410 $\pm$ 18,8	50 $\pm$ 3,8	5	+	<0,05

td - tidak terdeteksi

Tabel 5. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe Y dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH  $\pm$  2,5 dalam larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

No.	Penambahan H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar Fe <sup>2+</sup> (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar U <sup>6+</sup> (ppm)
1	0,3 $\pm$ 0,016	3,0 $\pm$ 0,05	420 $\pm$ 18,5	100 $\pm$ 7,3	0	+	<0,05
2	0,5 $\pm$ 0,017	2,5 $\pm$ 0,07	440 $\pm$ 15,7	80 $\pm$ 5,1	0	+	<0,05
3	0,3 $\pm$ 0,02	2,8 $\pm$ 0,07	430 $\pm$ 21,3	75 $\pm$ 5,2	0	+	td
4	0,3 $\pm$ 0,012	2,8 $\pm$ 0,06	430 $\pm$ 25,2	50 $\pm$ 4,6	0	+	<0,05
5	0,5 $\pm$ 0,02	3,3 $\pm$ 0,09	440 $\pm$ 14,8	50 $\pm$ 3,8	0	+	<0,05
6	-	2,6 $\pm$ 0,08	410 $\pm$ 19,6	60 $\pm$ 4,2	0	+	td

td - tidak terdeteksi

Tabel 6. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe M dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH  $\pm$  6,0 dalam larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

No.	Penambahan H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar Fe <sup>2+</sup> (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar U <sup>6+</sup> (ppm)
1	-	6,0 $\pm$ 0,31	410 $\pm$ 18,3	100 $\pm$ 8,3	0	+	<0,05
2	-	6,0 $\pm$ 0,23	400 $\pm$ 20,2	80 $\pm$ 4,3	1	+	<0,05
3	-	5,8 $\pm$ 0,24	410 $\pm$ 15,6	75 $\pm$ 3,5	2	+	td
4	-	5,7 $\pm$ 0,23	435 $\pm$ 17,8	75 $\pm$ 4,2	3	+	td
5	-	6,0 $\pm$ 0,18	425 $\pm$ 19,2	50 $\pm$ 3,3	4	+	<0,05
6	-	6,0 $\pm$ 0,22	400 $\pm$ 18,2	60 $\pm$ 2,4	5	+	<0,05

td-tidak terdeteksi

Tabel 7. Hasil pelindian U pada batuan fosfat tipe Y dengan menggunakan bakteri *T. ferrooxidans* F 402 pada kondisi pH  $\pm$  6,0 dalam larutan  $H_2SO_4$

No.	Penambahan $H_2SO_4$ (g)	Kondisi pH	larutan pot. rdks. (Eh, mV)	Perubahan kadar $Fe^{2+}$ (ppm)	Hasil pelindian		
					Masa ink. (minggu)	Jml. bakt.	Kadar $U^{6+}$ (ppm)
1	-	5,8 $\pm$ 0,18	420 $\pm$ 18,7	100 $\pm$ 7,5	0	+	<0,05
2	-	6,0 $\pm$ 0,15	390 $\pm$ 19,5	75 $\pm$ 4,9	1	+	td
3	-	5,7 $\pm$ 0,22	400 $\pm$ 20,4	75 $\pm$ 6,3	2	+	<0,05
4	-	5,9 $\pm$ 0,16	400 $\pm$ 20,2	50 $\pm$ 3,0	3	+	<0,05
5	-	6,2 $\pm$ 0,13	425 $\pm$ 16,8	50 $\pm$ 3,5	4	+	td
6	-	5,9 $\pm$ 0,12	420 $\pm$ 17,8	50 $\pm$ 4,2	5	+	<0,05

td - tidak terditeksi

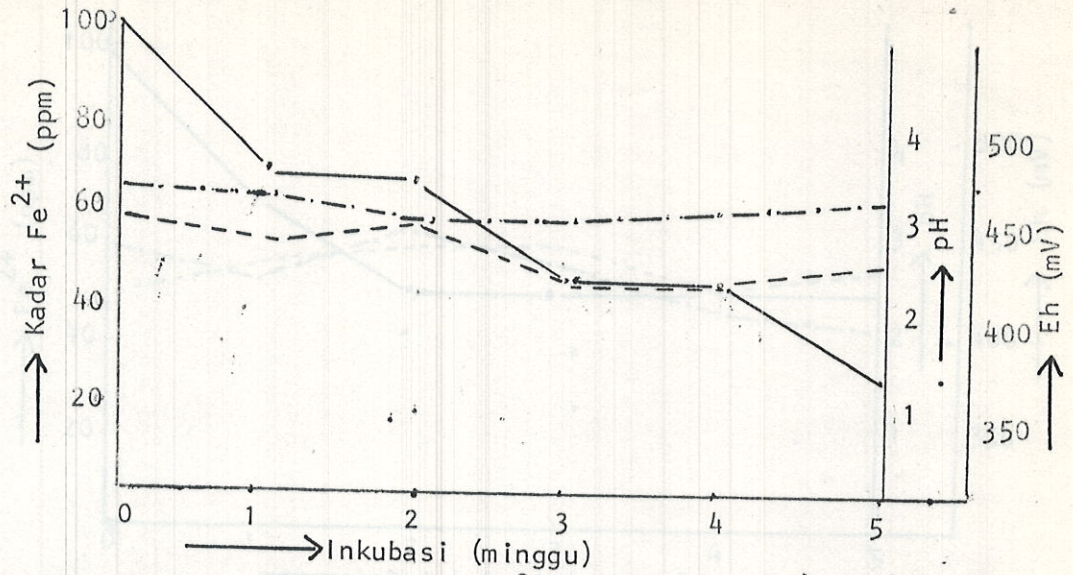
Tabel 8. Perubahan kadar  $Fe^{2+}$  (ppm) pada beberapa percobaan selama masa inkubasi 5 minggu

Percobaan Seri	Masa inkubasi (minggu)						Rata-rata (3 minggu terakhir)
	0	1	2	3	4	5	
1	100	70	70	50	50	30	43,3
2	100	90	85	60	50	25	43,3
3	100	75	75	50	50	50	50,0
4	100	80	75	75	50	60	65,0
5	100	70	50	50	50	50	50,0
6	100	80	75	50	50	60	55,8

Tabel 9. Perubahan potensial redoksi (Eh), pada beberapa percobaan selama masa inkubasi 5 minggu

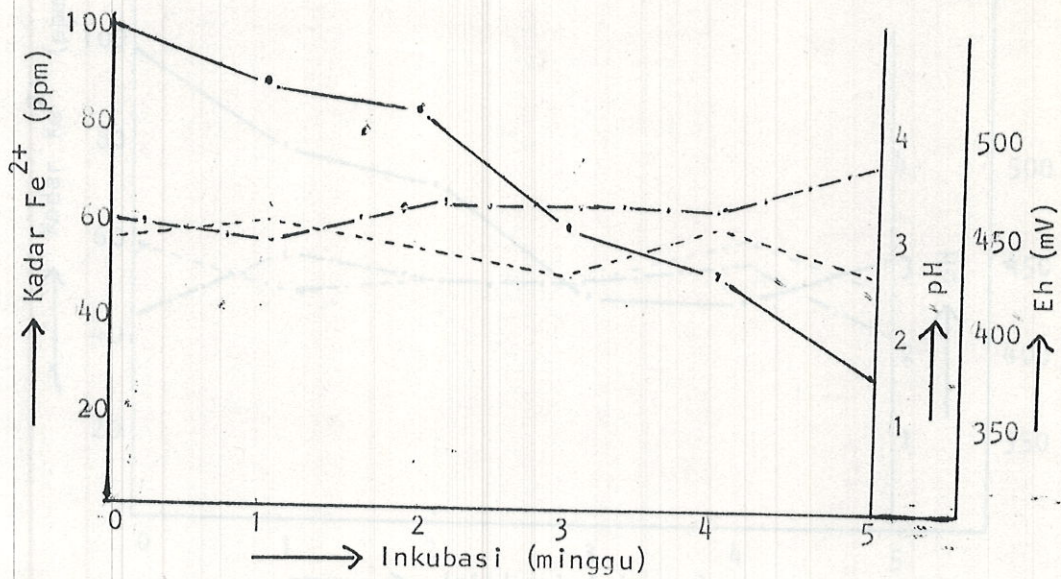
Percobaan Seri	Masa inkubasi (minggu)						Rata-rata (3 minggu terakhir)
	0	1	2	3	4	5	
1	470	465	450	450	460	470	460
2	450	440	460	470	470	480	473
3	420	390	400	400	425	420	415
4	410	400	410	435	425	400	420
5	450	435	460	440	420	410	423
6	420	440	430	430	440	410	427





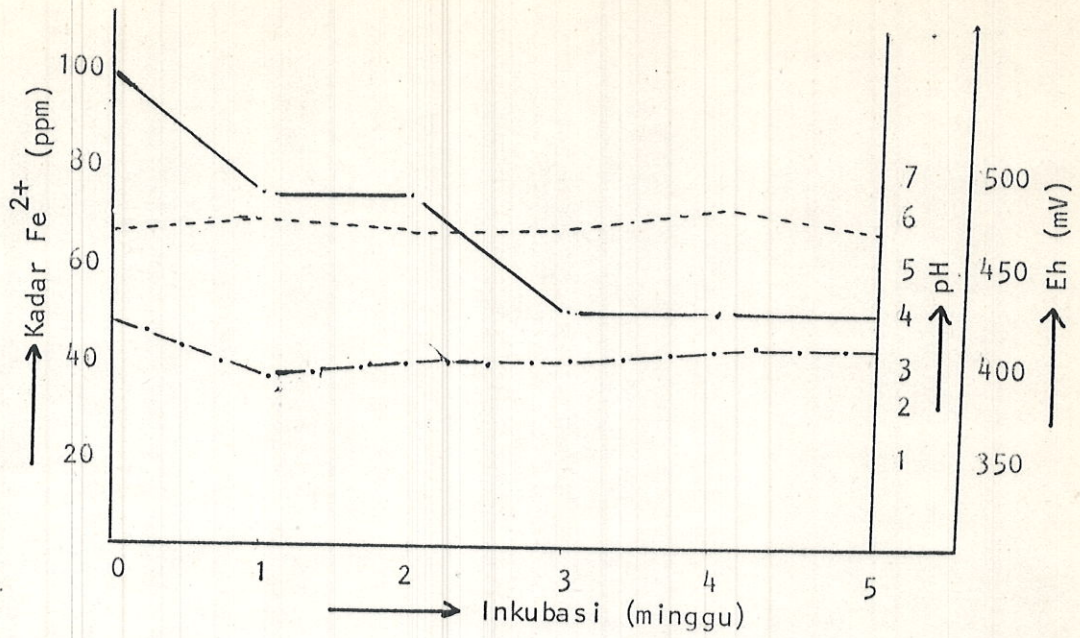
Gambar 1. Perubahan kadar Fe<sup>2+</sup> larutan, pH, dan potensial redoksi (Eh) pada pelindian batuan fosfat tipe M dalam medium 9 K dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402

— Fe<sup>2+</sup>    - - - - pH    - · - · - Eh

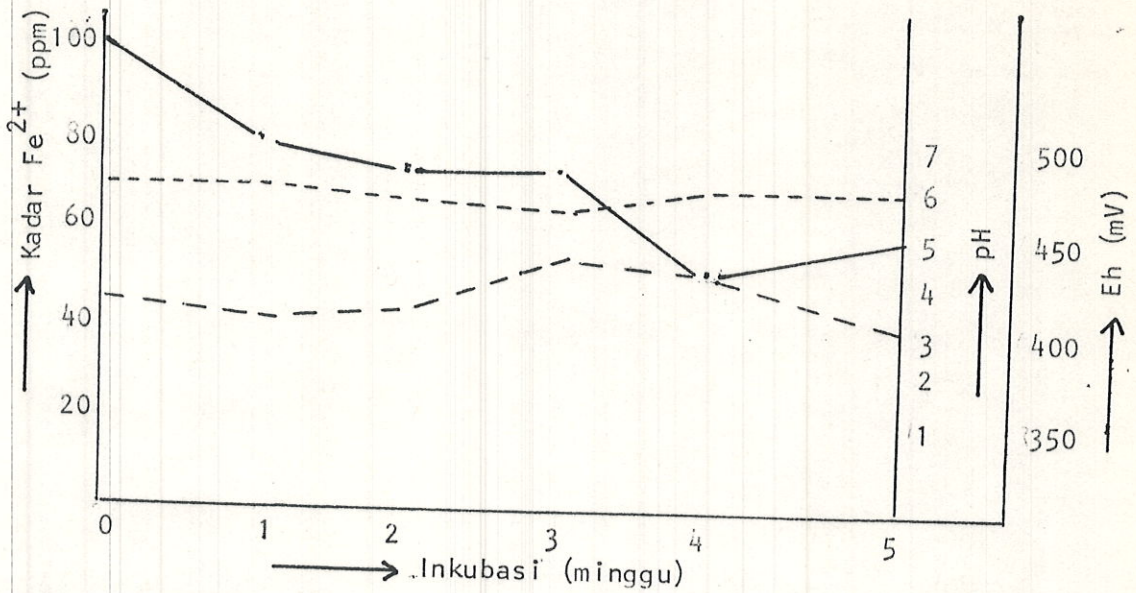


Gambar 2. Perubahan kadar Fe<sup>2+</sup> larutan, pH, dan potensial redoks (Eh) pada pelindian batuan fosfat tipe Y dalam medium 9 K dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402

— Fe<sup>2+</sup>,    - - - - pH,    - · - · - Eh



Gambar 5. Perubahan kadar  $Fe^{2+}$  larutan, pH, dan potensial redoksi (Eh) pada pelindian batuan fosfat tipe M dengan  $H_2SO_4$  dan bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* F 402  
 - - - - pH, ———  $Fe^{2+}$ , - · - · - Eh



Gambar 6. Perubahan kadar  $Fe^{2+}$  larutan, pH, dan potensial redoksi (Eh) pada pelindian batuan fosfat tipe Y dalam larutan  $H_2SO_4$  tanpa penyesuaian pH dengan bakteri *T. ferrooxidans* F 402  
 ———  $Fe^{2+}$ , - - - - pH, - · - · - Eh