

EKSTRAKSI TITANIUM DARI ILMENIT BANGKA MELALUI TAHAP DEKOMPOSISI DENGAN KOH DAN PELARUTAN DENGAN ASAM SULFAT

Rudi Subagja

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, gedung 470, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan.
Email: rudi.subagja@lipi.go.id

ABSTRAK

Pada percobaan ini titanium diekstrak dari Ilmenit Bangka melalui proses dekomposisi ilmenit dengan larutan KOH 10 mol/liter pada temperatur 150 ° C selama 4 jam, dilanjutkan dengan proses pelarutan titanium kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi. Tujuan dari percobaan adalah untuk mengamati pengaruh konsentrasi asam sulfat, temperatur dan waktu reaksi pelarutan terhadap kelarutan titanium kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi. Hasil percobaan memperlihatkan kenaikan konsentrasi asam sulfat dan temperatur pelarutan menyebabkan kenaikan jumlah fraksi titanium terlarut kedalam larutan asam sulfat. Percobaan pelarutan titanium dengan larutan asam sulfat 75 %, pada temperatur 125 ° C dan waktu pelarutan 2 jam, menghasilkan 85 % titanium terlarut kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi. Hasil studi kinetik proses pelarutan memperlihatkan proses pelarutan titanium mengikuti *diffusion control model* dengan energi aktivasi 59 KJ/mole .

Kata kunci: Ilmenit, ekstraksi, Titanium

ABSTRACT

At present experiment, Titanium has been extracted from Bangka's Ilmenite through decomposition of those Ilmenite with 10 mol/liter aqueous KOH solutions at temperature 150 ° C for 4 hours and it followed with dissolution of titanium from the decomposed Ilmenite into the sulfuric acid solutions. The aim of experiment is to investigate the effect of sulfuric acid concentrations, temperature and dissolution time on the titanium and iron dissolution from the decomposed Ilmenite. Result of experiment shows either increase of sulfuric acid concentration or decomposition temperatures lead to increase the fraction of titanium dissolved into the sulfuric acid solutions. The dissolution experiment using 75 % sulfuric acid solutions at temperature 125 ° C for dissolution time 2 hours results 85 % of titanium was dissolved into the aqueous sulfuric acid solution from the decomposed ilmenite. Result the kinetic study shows the titanium dissolution from decomposed Ilmenite follows the diffusion control model, with activated energy 59 KJ/mole.

Keywords: *Ilmenite, extraction, Titanium*

PENDAHULUAN

Ilmenit adalah mineral yang mempunyai rumus kimia FeTiO_3 . Mineral ini dapat digunakan sebagai bahan baku untuk membuat pigmen TiO_2 , logam besi dan senyawa senyawa kimia yang mengandung besi. Di Industri, TiO_2 banyak digunakan sebagai pigmen untuk Cat, bahan aditif pada proses pembuatan kertas, bahan baku keramik, bahan baku industri Farmasi dan akhir akhir ini TiO_2 juga banyak digunakan untuk bahan fotokatalis yaitu sebagai katalis yang dapat

menguraikan bahan pewarna organik dengan bantuan sinar ultra violet [1-4].

Di Indonesia, ilmenit terdapat di beberapa daerah, diantaranya adalah di Kalimantan barat, pantai selatan jawa, dan kepulauan Bangka Belitung. Namun sampai dengan saat ini, Ilmenit tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Permasalahan yang dihadapi dalam pemanfaatan Ilmenit Bangka adalah struktur mineralnya yang kompleks yang menimbulkan kesulitan pada tahap proses pengolahannya. Sehubungan hal tersebut, beberapa kegiatan penelitian untuk

pemanfaatan Ilmenit telah dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI [5-8], dan salah satu dari hasil kegiatan penelitian dimaksud akan disampaikan pada makalah ini. Disamping kegiatan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti LIPI, beberapa peneliti dari berbagai negara juga telah melakukan kegiatan penelitian untuk mengembangkan proses guna pemanfaatan ilmenit. Proses proses tersebut dapat digolongkan sebagai proses pirometalurgi, hidrometalurgi atau kombinasi proses pirometalurgi dan hidrometalurgi. Pada proses pirometalurgi, Ilmenit direduksi dengan bahan pereduksi yang berasal dari antrasit atau batubara, kemudian dilebur pada temperatur tinggi untuk menghasilkan besi dan terak yang mengandung TiO_2 [9-12]. Proses lainnya yang telah dikembangkan adalah proses pengolahan ilmenit melalui jalur hidrometalurgi dengan menggunakan pelarut asam sulfat [13-16], atau proses yang dikembangkan melalui jalur hidrometalurgi dengan menggunakan pelarut asam klorida [17-20]. Disamping proses proses tersebut, pada saat ini Xue dkk [21] telah mengembangkan cara untuk memisahkan titanium dan besi dari ilmenit melalui tahapan dekomposisi ilmenit yang dilanjutkan dengan proses pelarutan asam. Tujuan dari tahap dekomposisi adalah untuk merubah sifat kimia ilmenit agar lebih mudah larut dalam media asam. Pada proses dekomposisi, terak yang mengandung TiO_2 direaksikan dengan NaOH pada temperatur dari $400^\circ C$ sampai dengan $475^\circ C$ pada kondisi tekanan atmosfer. Ilmenit yang telah terdekomposisi kemudian dicuci dengan air dan direaksikan dengan larutan asam klorida untuk melarutkan titanium dari ilmenit terdekomposisi. Hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa hampir 95-98 % titanium dapat diekstraksi dari terak. Proses dekomposisi berbasis basa lainnya telah dikembangkan oleh AM Amer untuk mengekstrak titanium dari konsentrat Ilmenit [22]. Pada proses ini

Ilmenit direaksikan dengan NaOH pada temperatur $200^\circ C$ dalam atmosfer oksigen untuk membentuk natrium titanat (Na_2TiO_3) yang kemudian direaksikan dengan larutan HCl untuk melarutkan titanium dari Na_2TiO_3 . Hasil percobaannya memperlihatkan lebih dari 90 % titanium dapat diekstrak dari Ilmenit. Proses dekomposisi basa lainnya dikembangkan oleh Liu dkk [23] Tong dkk [24] dan A.A. Nayl dkk [25], yang menggunakan KOH untuk mendekomposisi ilmenit. Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa 93 % titanium dapat diekstrak dengan asam oksalat, 92 % titanium dapat diekstrak dengan asam klorida dan 89 % titanium dapat diekstrak dengan asam sulfat masing masing dari Ilmenit yang telah mengalami dekomposisi dengan KOH.

Untuk mengetahui kemungkinan penerapan proses dekomposisi ilmenit Bangka oleh KOH, pada penelitian ini, Ilmenit Bangka diteliti melalui pendekatan jalur proses dekomposisi dengan basa KOH yang dilanjutkan dengan proses pelarutan titanium dari Ilmenit yang telah mengalami proses dekomposisi kedalam larutan asam sulfat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh konsentrasi asam sulfat, temperatur dan waktu reaksi terhadap proses pelarutan titanium dari Ilmenit terdekomposisi.

METODE

Bahan baku percobaan

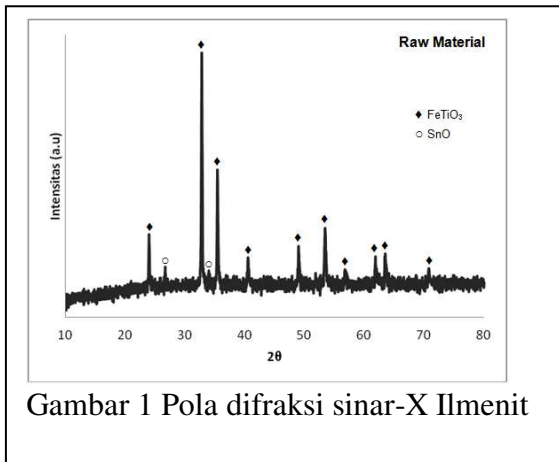
Bahan baku yang digunakan dalam percobaan adalah Ilmenit dari Bangka, Kalium hidroksida (KOH), Asam sulfat dan air aqua demineral. Komposisi kimia dan pola difraksi sinar X dari Ilmenit yang digunakan dalam percobaan diperlihatkan masing masing pada tabel 1 dan gambar 1.

Tabel 1: Hasil analisa Ilmenit dengan X-Ray Fluoresence (XRF)

Senyawa	%
Fe_2O_3	49,44
TiO_2	38,30

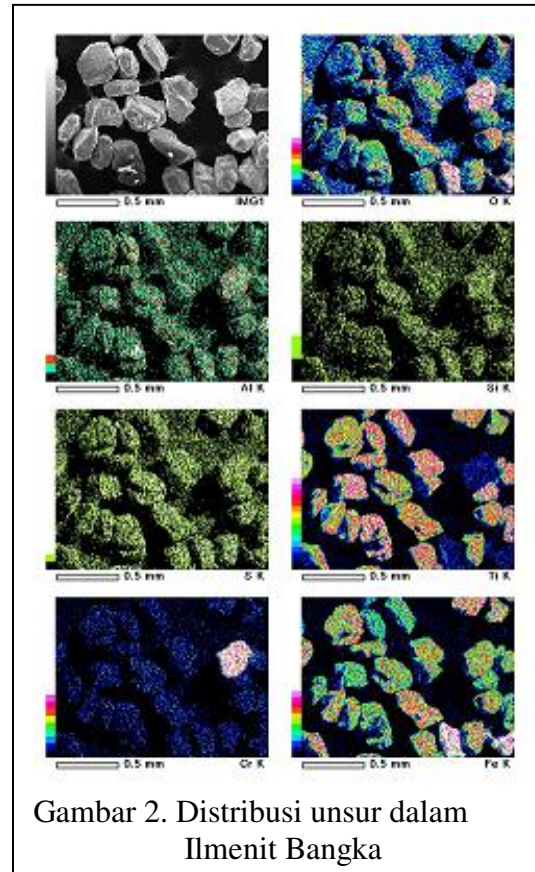
SiO ₂	1,76
Al ₂ O ₃	1,78
MnO	2,00
MgO	1,44
CaO	0,08
K ₂ O	0,03
P ₂ O ₅	0,17
Cr ₂ O ₃	2,66
SnO ₂	1,16

Dari data pada tabel 1 dapat dilihat bahwa senyawa dominan penyusun Ilmenit Bangka adalah Fe₂O₃ dan TiO₂. Sedangkan senyawa lainnya adalah SiO₂, Al₂O₃, MnO, MgO, CaO, K₂O, P₂O₅, Cr₂O₃ dan SnO₂ akan tetapi jumlahnya relatif kecil. Kemudian dari hasil analisis dengan alat difraksi sinar X (XRD) pada gambar 1 dapat dilihat bahwa Ilmenit merupakan senyawa dominan dan bahan baku ilmenit mengandung fasa SnO dalam jumlah relatif kecil.



Gambar 1 Pola difraksi sinar-X Ilmenit

Untuk mengetahui distribusi unsur dalam ilmenit Bangka, sebagian dari ilmenit Bangka dianalisis dengan menggunakan alat Scanning Electron Microscop (SEM), hasilnya diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Distribusi unsur dalam Ilmenit Bangka

Data pada gambar 2 memperlihatkan unsur besi dan titanium berada dalam satu posisi dalam matrik ilmenit dan membentuk ikatan kimia yang kompleks.

Prosedur percobaan

(a) Dekomposisi Ilmenit dengan KOH

Proses dekomposisi Ilmenit dilakukan dengan cara mereaksikan Ilmenit yang mempunyai ukuran partikel lebih kecil dari 100 mesh dengan larutan KOH 10 mol/liter pada temperatur 150 ° C selama 4 jam dalam autoclave. Uraian percobaan secara rinci terkait dekomposisi ilmenit Bangka dengan larutan KOH dapat dilihat pada hasil penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rudi Subagja dkk [7]

(b) Pelarutan titanium dari ilmenit terdekomposisi

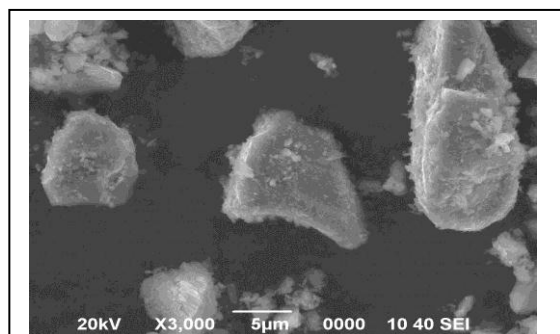
Percobaan untuk melarutkan titanium dari Ilmenit terdekomposisi (ilmenit yang telah mengalami proses dekomposisi dengan larutan KOH) dilakukan dengan

cara mereaksikan Ilmenit terdekomposisi dengan larutan asam sulfat dalam reaktor gelas yang terbuat dari labu erlemeyer leher 3 kapasitas 500 ml. Percobaan pelarutan dilakukan dengan cara memasukan 300 ml larutan asam sulfat dengan konsentrasi tertentu kedalam reaktor gelas. Larutan kemudian dipanaskan sampai temperatur tertentu. Setelah temperatur yang diinginkan tercapai, 50 gram ilmenit terdekomposisi diumpankan kedalam reaktor. Larutan kemudian diaduk dengan pengaduk magnetik dan percobaan dilakukan dalam perioda dan temperatur tertentu. Setelah percobaan pelarutan selesai, campuran larutan dan padatan dikeluarkan dari reaktor untuk selanjutnya disaring. Larutan hasil proses penyaringan kemudian dianalisis kandungan titanium dan besinya dengan alat Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Struktur mikro ilmenit terdekomposisi

Gambar 3 memperlihatkan struktur mikro ilmenit terdekomposisi dari hasil analisis menggunakan alat Scanning Electron Microscop (SEM), sedangkan table 2 memperlihatkan hasil analisis EDX dari ilmenit terdekomposisi. Dari data pada tabel 2 dapat dilihat bahwa setelah proses dekomposisi dengan KOH, unsur besi, titanium dan oksigen merupakan unsur dominan yang terdapat dalam ilmenit terdekomposisi.

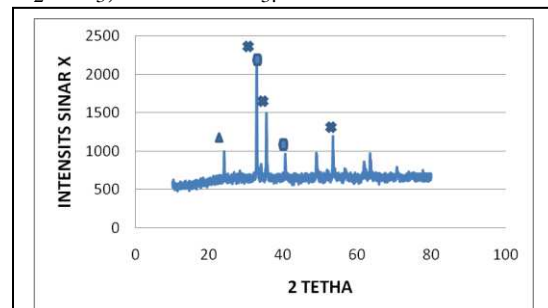


Gambar 3 struktur mikro ilmenit terdekomposisi oleh KOH 10 mol/liter pada temperatur 150 ° C selama 4 jam

Unsur	(keV)	Mass%	Error%	Atom%
C	0.277	10.83	0.10	24.75
O	0.525	22.89	0.36	39.30
Mg	1.253	0.66	0.15	0.75
Si	1.739	0.19	0.11	0.18
K	3.312	3.79	0.10	2.66
Ca	3.690	0.36	0.12	0.25
Ti	4.508	25.53	0.15	14.64
Cr	5.411	0.11	0.22	0.06
Fe	6.398	33.64	0.28	16.54
Cu	8.040	2.01	0.58	0.87
Total		100.00		100.00

b. Pola difraksi sinar X ilmenit terdekomposisi

Gambar 4 memperlihatkan pola difraksi sinar X dari Ilmenit terdekomposisi. Dari gambar 4 dapat dilihat bahwa fasa fasa yang terbentuk dalam ilmenit terdekomposisi adalah Rutil, K_2TiO_3 , dan $FeTiO_3$.



Gambar 4: memperlihatkan pola difraksi sinar X dari Ilmenit terdekomposisi

▲ Rutil, ■ K_2TiO_3 , ★ $FeTiO_3$

c. Pengaruh konsentrasi asam sulfat terhadap kelarutan besi dan titan

Percobaan untuk mengamati pengaruh konsentrasi asam sulfat terhadap kelarutan titanium dan besi dari Ilmenit terdekomposisi, dilakukan pada temperatur 50 ° C dan 75 ° C, sedangkan konsentrasi asam sulfat yang digunakan adalah 50 % dan 75 %. Hasil percobaan ditampilkan pada gambar 5 dan gambar 6 masing masing untuk proses pelarutan titanium dan besi kedalam larutan asam sulfat pada temperatur 50 ° C dan 75 ° C. Pada percobaan ini jumlah titanium atau besi yang terlarut kedalam larutan asam sulfat dinyatakan sebagai fraksi titanium atau

fraksi besi terlarut, masing masing dinyatakan sebagai (X_{Ti}) , dan (X_{Fe}) sebagaimana dapat dilihat pada persamaan 1 dan 2.

Fraksi titanium terlarut

$$X_{Ti} = (C_{Ti} \times V) / (Y_{Ti} \times W) \dots\dots\dots(1)$$

Fraksi besi terlarut

$$X_{Fe} = (C_{Fe} \times V) / (Y_{Fe} \times W) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana,

C_{Ti} = Konsentrasi titanium dalam larutan hasil proses pelarutan ilmenit terdekomposisi

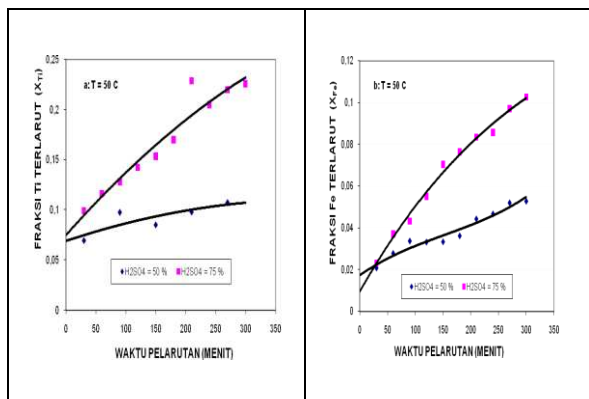
C_{Fe} = Konsentrasi besi dalam larutan hasil proses pelarutan ilmenit terdekomposisi

V = Volume total larutan

Y_{Ti} = Persen berat titanium dalam ilmenit terdekomposisi

Y_{Fe} = Persen berat besi dalam ilmenit terdekomposisi

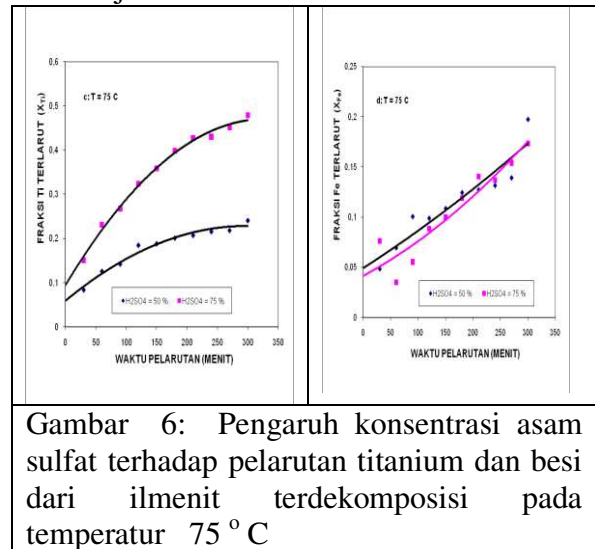
W = Berat total ilmenit terdekomposisi



Gambar 5: Pengaruh konsentrasi asam sulfat terhadap pelarutan titanium dan besi dari ilmenit terdekomposisi pada temperatur 50 °C

Hasil percobaan pada gambar 5 memperlihatkan bahwa untuk temperatur pelarutan 50 °C, fraksi titanium dan besi terlarut kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi meningkat jika

konsentrasi asam sulfat dinaikkan dari 50 % menjadi 75 %.

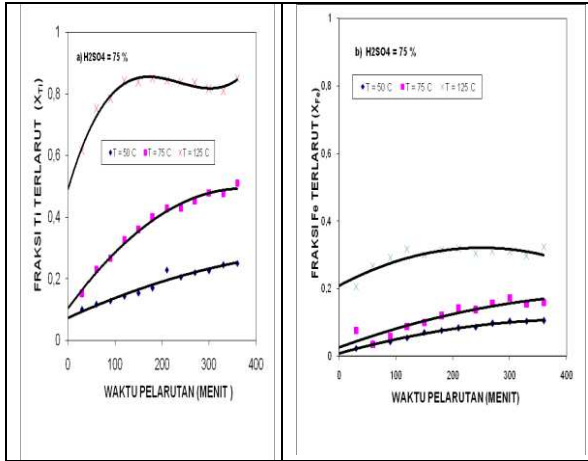


Gambar 6: Pengaruh konsentrasi asam sulfat terhadap pelarutan titanium dan besi dari ilmenit terdekomposisi pada temperatur 75 °C

Akan tetapi dari hasil percobaan pada gambar 6 untuk temperatur pelarutan 75 °C, fraksi titanium terlarut kedalam larutan asam sulfat meningkat dan fraksi besi terlarut kedalam larutan asam sulfat sedikit menurun jika konsentrasi asam sulfat dinaikkan dari 50 % menjadi 75 %.

d. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan titanium dan besi

Percobaan untuk mengamati pengaruh temperatur terhadap kelarutan titanium dan besi dari ilmenit terdekomposisi, dilakukan pada temperatur 50 °C sampai 125 °C menggunakan larutan asam sulfat konsentrasi 75 % sebagai pelarut. Hasil percobaan pada gambar 7 memperlihatkan bahwa jumlah titanium dan besi terlarut kedalam larutan asam sulfat meningkat jika temperatur pelarutan dinaikkan dari 50 °C menjadi 125 °C. Untuk waktu pelarutan 120 menit, 86 % titanium dan 30 % besi larut kedalam larutan asam sulfat dan jika waktu pelarutan diperpanjang sampai 360 menit, fraksi titanium dan besi terlarut cenderung konstan.



Gambar 7: Pengaruh temperatur terhadap pelarutan titanium dan besi dari ilmenit terdekomposisi

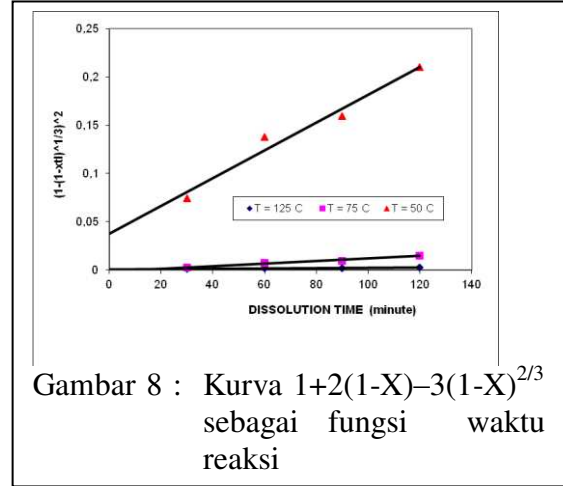
Model kinetik

Model kinetik yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada *shrinking core model* [26]. Model ini dipilih karena dari data penelitian pada gambar 2, gambar 3 dan tabel 2 nampak bahwa titanium dan besi berada bersama sama dalam ilmenit maupun ilmenit terdekomposisi. Kemudian dari hasil penelitian pada gambar 5 sampai dengan gambar 7 dapat dilihat bahwa jumlah titanium terlarut lebih besar dari pada jumlah besi terlarut. Artinya selama proses pelarutan terdapat matrik besi yang harus dilewati oleh ion titanium sebelum ion titanium tersebut masuk kedalam fasa larutan, dengan kata lain ion titanium harus berdifusi melalui fasa besi yang terdapat pada matrik ilmenit terdekomposisi sebelum ion titanium tersebut masuk kedalam fasa larutan. Dengan anggapan proses pelarutan titanium berlangsung mengikuti proses difusi maka persamaan yang digunakan adalah persamaan 3 berikut [26]:

$$1+2(1-X_{Ti})-3(1-X_{Ti})^{2/3} = k t \dots\dots\dots(3)$$

Dimana X_{Ti} adalah fraksi titanium terlarut kedalam larutan asam sulfat, k adalah konstanta laju dan t adalah waktu pelarutan.

Jika $1 + 2 (1- X_{Ti}) - 3 (1- X_{Ti})^{2/3}$ pada persamaan 3 digambarkan sebagai fungsi waktu pelarutan maka hasilnya diperlihatkan pada gambar 8 berikut:



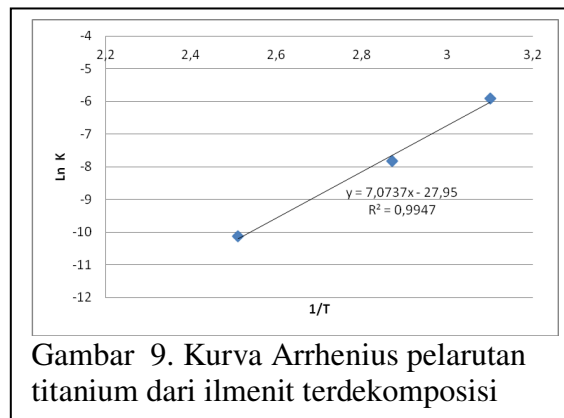
Gambar 8 : Kurva $1+2(1-X)-3(1-X)^{2/3}$ sebagai fungsi waktu reaksi

Energi aktivasi pelarutan titanium dari ilmenit terdekomposisi

Dengan menggunakan persamaan Arrhenius, hubungan antara konstanta laju pada persamaan 3 dengan temperatur dinyatakan oleh persamaan 4 berikut:

$$k = A \exp (-E_A/RT) \dots\dots\dots(4)$$

Dimana k konstanta laju, A adalah konstanta Arrhenius (menit⁻¹), R adalah konstanta gas ideal 8.314 Joule/Kelvin-mole, T adalah temperature dalam Kelvin dan E_A adalah energi aktivasi (joule/mole). Dengan menggambarkan ln k dari persamaan 4 terhadap (1/T) sebagaimana diperlihatkan pada gambar 9 diperoleh energi aktivasi 59 Kj/mol.



Gambar 9. Kurva Arrhenius pelarutan titanium dari ilmenit terdekomposisi

SIMPULAN DAN SARAN

Titanium dapat diekstrak dari Ilmenit Bangka dengan cara mendekomposisi Ilmenit oleh larutan KOH 10 mol/liter pada temperatur 150 ° C selama 4 jam, dilanjutkan dengan tahap pelarutan titanium kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi. Dari hasil pengamatan pengaruh variabel percobaan yang meliputi temperatur, konsentrasi asam sulfat dan waktu pelarutan terhadap kelarutan titanium dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada temperatur pelarutan 50 ° C, kenaikan konsentrasi asam sulfat dari 50 % menjadi 75 %, menyebabkan fraksi titanium dan besi terlarut kedalam larutan asam sulfat dari ilmenit terdekomposisi meningkat
2. Pada temperatur pelarutan 75 ° C, kenaikan konsentrasi asam sulfat dari 50 % menjadi 75 % menyebabkan fraksi titanium terlarut dari ilmenit terdekomposisi kedalam larutan asam sulfat meningkat akan tetapi fraksi besi terlarut dari ilmenit terdekomposisi kedalam larutan asam sulfat sedikit menjadi turun.
3. Pada proses pelarutan menggunakan konsentrasi asam sulfat 75 %, kenaikan temperatur pelarutan dari 50 ° C menjadi 125 ° C, menyebabkan jumlah fraksi titanium dan besi terlarut dari ilmenit terdekomposisi kedalam larutan asam sulfat meningkat.
4. Pada temperatur pelarutan 125 ° C dan waktu pelarutan 120 menit, sebanyak 86 % titanium dan 30 % besi dapat dilarutkan dari ilmenit terdekomposisi kedalam larutan asam sulfat.
5. Dari hasil kinetika studi diketahui bahwa proses pelarutan titanium dari ilmenit terdekomposisi mengikuti model difusi dengan energi aktivasi 59 KJ/mol

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah memberikan dukungan dana untuk kegiatan penelitian ini melalui program riset kompetitif LIPI. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Pusat penelitian Metalurgi dan Material LIPI yang telah menyediakan sarana untuk pelaksanaan kegiatan penelitian ini dan kepada Lia Andriyah dan Latifa Hanum Lalasari yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian ini di laboratorium Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI.

DAFTAR PUSTAKA

- Wensheng Zhang, Zhaowu Zhu, Chu Yong Cheng, 2011, “A literature review of titanium metallurgical processes”, *Hydrometallurgy* 108, 177–188
- A. Fujishima, K. Honda, 1972, *Nature* 238, 37.
- A. Fujishima, K. Kohayakawa, K. Honda, 1975, *J. Electrochem. Soc.* 122, 1487
- A. Fujishima, T.N. Rao, D.A. Tryk, 2000, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 1 (1), 1
- Indarto Katim, 1976, “laporan penelitian percobaan reduksi Ilmenit sebagai bagian dari proses pembuatan rutil sintetik”, internal report, Puslit Metalurgi LIPI, Serpong
- Binudi Rahardjo, 2007, “Pengolahan Mineral Ikutan bijih Timah untuk pembuatan bahan baku Industri”, dalam *Prosiding Seminar Kalimantan Timur & Bangka Belitung*, Rudi subagja ed, 154-159
1. Rudi Subagja, Lia A, Latifa H, 2013, “Decomposition of ilmenite from Bangka island Indonesia with KOH solutions”, *Asian Transaction on basic and applied sciences*, vol.3, issue 2
 2. Rudi Subagja, Lia A, Latifa H, 2013, “Titanium Dissolution from Indonesian Ilmenite”, *International Journal of*

- Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS, Vol:13 Issue: 04, Agustus
3. Tsuchida, H., Narita, E., Takeuchi, H., Adachi, M., Okabe, T., 1982, "Manufacture of high pure titanium (IV) oxide by the chloride, process: 1. Kinetic study of ilmenite ore in concentrated, hydrochloric acid solution", *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 55 (6), 1934–1938.
 4. Mohanty, S.P., Smith, K.A., 1993, "Alkali metal catalysis of carbothermic reaction of ilmenite". *Trans. Inst. Min. Metall.* 102, C163–C173
 5. Mackey, T.S., 1994, "Upgrading ilmenite into a high-grade synthetic rutile", *Journal of Metal* 59–64, April.
 6. Mahmoud, Y.D., Georges, J.K., 1997, "Processing titanium and lithium for reduced-cost application", *Journal of Metal* 49 (6), 20–27, June.
 7. Han, K.N., Rubcumintara, T., Fuerstenau, M.C., 1986, "Leaching behavior of ilmenite with sulfuric acid", *Metall. Trans.* 18B, 325–330.
 8. Jagasekera, S., Marinovich, Y., Avraamid es, J., Baily, S.I., 1995, "Pressure leaching of reduced ilmenite", *Hydrometallurgy* 39, 183–199.
 9. Sasikumar, C., Rao, D.S., Srikanth, S., Ravikumar, B., Mukhopadhyay, N.K., Mehrotra, S.P., 2004, "Effect of mechanical activation on the kinetics of sulfuric acid leaching of beach sand ilmenite from Orissa, Indian", *Hydrometallurgy* 75, 189–204.
 10. Liang, B., Li, C., Zhang, C.G., Zhang, Y.K., 2005, "Leaching kinetics of Panzhihua ilmenite in sulfuric acid", *Hydrometallurgy* 76, 173–179.
 11. Olanipekun, E., A., 1999, "kinetic study of the leaching of a Nigerian ilmenite ore by hydrochloric acid", *Hydrometallurgy* 53, 1–10.
 12. Lanyon, M.R., Lwin, T., Merritt, R.R., 1999, "The dissolution of iron in the hydrochloric acid leach of an ilmenite concentrate", *Hydrometallurgy*, 51 (3), 299–323
 13. Ogasawara, T., Veloso de Araiyo, R.V., 2000, "Hydrochloric acid leaching of a pre-reduced Brazilian ilmenite concentrate in an autoclave", *Hydrometallurgy* 56 (2), 203–219.
 14. Van Dyk, J.P., Vegter, N.M., Chris Pistorius, P., 2002, "Kinetics of ilmenite dissolution in hydrochloric acid", *Hydrometallurgy* 65, 31–36.
 15. Xue, T. Wang, L, Qi, Chu, Qw, J Liu, C, 2009, "Decomposition kinetics of Titanium slag in sodium hydroxide system", *Hydrometallurgy* 95, 22-27.
 16. A.M. Amer, 2002, "Alkaline pressure leaching of mechanically activated Rosella Ilmenite concentrate", *Hydrometallurgy* 67, 125 – 133
 17. Liu, Y.M., Qi, T., Chu, J.L., Tong, Q., Zhang, Y., 2006, "Decomposition of ilmenite by concentrated KOH solution under atmospheric pressure", *International J. Mineral Processing* 81, 79–84.
 18. Tong, Q.J., Qi, T., Liu, Y.M., 2007, "Preparation of potassium titanate whiskers and titanium dioxide from titaniferous slag using KOH sub-molten salt method", *Chinese J. Process Engineering* 7 (1), 85–89.
 19. A.A. Nayl, H.F. Aly, 2009, "Acid leaching of ilmenite decomposed by KOH", *Hydrometallurgy*, Volume 97, Issues 1–2, 86–93, June
 20. Octave Levenspiel, 1972, *Chemical reaction engineering* 2nd ed, Wiley International ed, New York