

MODEL PENYUSUTAN PARTIKEL PADA PELINDIAN TITANIUM DALAM ILMENIT MEMAKAI HCL

MV Purwani dan Suyanti

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

email: purwanimv@gmail.com

ABSTRAK

MODEL PENYUSUTAN PARTIKEL PADA PELINDIAN TITANIUM DALAM ILMENIT MEMAKAI HCL. Telah dilakukan penelitian pelindian ilmenit memakai HCl. Ilmenit merupakan tailing pengolahan pasir zirkon. Tailing pengolahan pasir zirkon mengandung Zr, Ti, Nb dan Fe. Pada penelitian ini akan dilakukan penentuan kinetika pelindian (leaching) Ti dalam ilmenit memakai HCl berdasar shrinking particle (penyusutan partikel) model. Dari hasil penelitian pelindian Ti dalam ilmenit memakai HCl, dapat diambil kesimpulan bahwa pada pelindian 50 g ilmenit memakai 11 M HCl, semakin tinggi suhu pelindian konversi Ti semakin besar. Mekanisme proses pelindian dikontrol oleh Sphere Reaction (reaksi bentuk bola) dengan

rumus $1 - (1-\alpha)^{1/3} = \frac{k \cdot C}{r_0} \cdot t = kIt$, hubungan antara suhu (T) dengan konstanta kecepatan reaksi (k), $k = 61,744 \cdot e^{-4553,3/T}$ atau $\ln k = -4553,3/T + 4,123$, faktor frekuensi $A = 61,744$, energi aktivasi $E = 37,856$ kJ/mol.

Kata kunci : titanium, ilmenite, pelindian, model penyusutan partikel

ABSTRACT

A SHRINKING PARTICLE MODEL AT PELINDIAN OF TITANIUM IN ILMENITE USE HCl. The research of ilmenite leaching has conducted. Ilmenite was tailings of zircon sand processing. Zircon sand processing tailings containing Zr, Ti, Nb and Fe. This research will be conducted to determine the kinetic leaching of Ti in HCl based shrinking core models. From the research results ilmenite leaching of Ti in HCl wear, it can be concluded that the 50 grams of ilmenite pelindian wear 11 M HCl leaching, the higher temperature was conducted the greater of the Ti conversion. The mechanism of the leaching process was controlled by Sphere

Reaction with formula equation $1 - (1-\alpha)^{1/3} = \frac{k \cdot C}{r_0} \cdot t = kIt$, the relationship between temperature (T) with the reaction rate constant (k), $k = 61,744 \cdot e^{-4553,3 / T}$ or $\ln k = -4553,3 / T + 4.123$, the frequency factor $A = 61.744$, the activation energy $E = 37.856$ kJ / mol.

Keywords: titanium, ilmenite, pelindian, shrinking particle models

PENDAHULUAN

Ilmenit (FeOTiO_2) ditemukan berupa bijih dengan skala yang besar atau sebagai deposit alluvial sekunder (berupa pasir) yang mengandung mineral logam berat. Besi dipisahkan dari permukaan ilmenit untuk mendapatkan TiO_2 dalam jumlah besar. Hampir 95% ilmenit dan rutile diproduksi untuk menghasilkan pigmen TiO_2 [1].

Keunggulan titanium, salah satu karakteristik titanium yang paling terkenal bahwa titanium sama kuatnya dengan baja, tetapi hanya 60% dari berat baja. Kekuatan fatik (*fatigue strength*) lebih tinggi daripada paduan aluminium. Aplikasi titanium dalam berbagai bidang seperti dalam bidang: militer, industri, kedokteran, mesin [3]. Titanium dioksida juga digunakan sebagai bahan dalam *memristor*, elemen sirkuit elektronik baru. Hal ini dapat digunakan untuk konversi energi surya berbasis pada pewarna, polimer, sel surya nanokristal TiO_2 dengan menggunakan polimer terkonjugasi sebagai elektrolit

padat. Kristal tunggal sintetik dan film TiO_2 digunakan sebagai semikonduktor, dan juga dalam cermin dielektrik gaya Bragg-stack karena indeks bias TiO_2 tinggi (2,5 - 2,9) [2,3].

Pada *upgrading* pasir zirkon secara mekanik untuk membuat konsentrat zirkon sebelum dilakukan pengolahan secara kimia di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, diperoleh *tailing* yang mengandung Ti dan Fe (besi). *Tailing* ini mempunyai komposisi yang sangat mirip dengan ilmenit. Tabel 1 adalah hasil analisis pemisahan pasir zirkon secara mekanik [4].

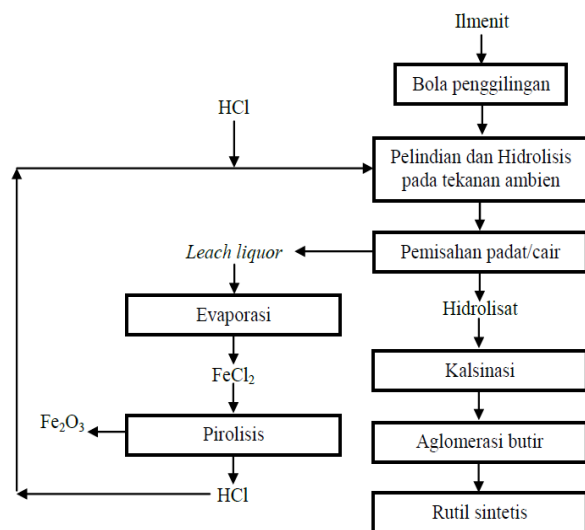
G.K. Das, Y. Pranolo, Z. Zhu, C.Y. Cheng [6], melakukan pelindian atau *leaching* ilmenit memakai larutan HCl, efisiensi Ti 94% , Tao Tao, Qi-yuan Chen, Hui-ping Hu, Zhou-lan Yin, Ying Chen [7] membuat TiO_2 *nanoparticles* dari pelindian ilmenit memakai larutan HCl, Ping Tan, Hui-ping Hu, Li Zhang [8] mempelajari pengaruh oksidasi reduksi pada pelindian ilmenit memakai larutan HCl, Feixiang Wu, Xinhai Li, Zhixing Wang, Ling Wu,

Huajun Guo, Xunhui Xiong, Xiaoping Zhang, Xiaojuan Wang [9] menambahkan *Hydrogen peroxide* pada hidrolisa residu titania dari hasil pelindian ilmenit memakai larutan HCl. Li Zhang, Huiping Hu, Zhi Liao, Qiyuan Chen, Jun Tan [10]

juga mengolah Panxi ilmenit memakai larutan HCl. Li Zhang, Huiping Hu, Liangping Wei, Qiyuan Chen, Jun Tan [11] melakukan pelindian ilmenit (FeTiO₂) dengan aktivasi secara mekanik.

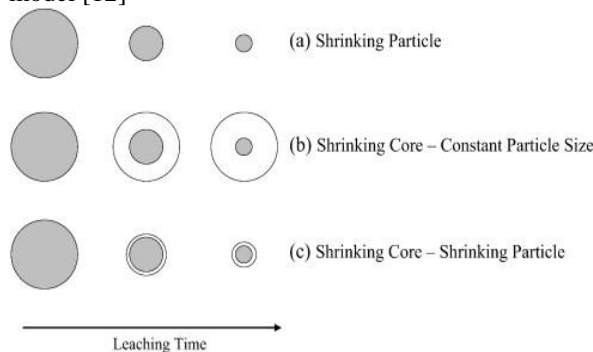
Tabel 1. Analisis hasil pemisahan pasir zirkon secara mekanik

	ZrO ₂	TiO ₂	SiO ₂	FeO ₂	SnO ₂	CrO ₂	Al ₂ O ₃	NbO ₂	MnO ₂
Head sample	54,1	5,4	21,1	2,4	0,6	0,5	0,4	0,1	0,1
Konsentrat	60,9	5,6	5,6	2,7	1,0	0,6	0,5	0,2	0,3
Medeling	40,3	13,1	6,6	3,5	1,2	0,7	1,2	0,3	0,2
Tailing	36,1	10,6	16,3	8,6	0,3	1,4	0,8	0,5	0,4



Gambar 1. Diagram kotak pemisahan atau pembuatan TiO₂ [5]

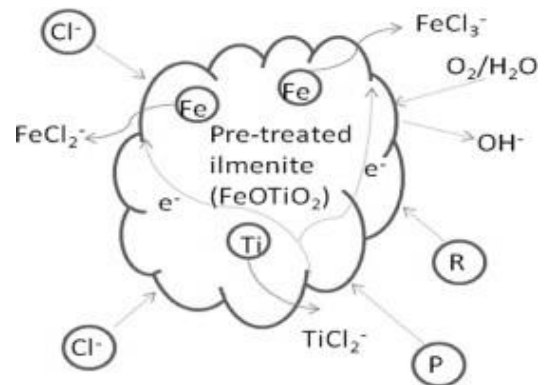
Pelindian atau *leaching* adalah ekstraksi padat - cair yang merupakan proses ekstraksi suatu konstituen yang dapat larut (*solute*) pada suatu campuran solid dengan mempergunakan pelarut. Pada proses pelindian, butir - butir padatan akan menyusut bereaksi dengan pelarut (Gambar 2,3 dan 4). Proses pelindian berdasar *shrinking particle* model [12]



Gambar 2. Penyusutan partikel pada *shrinking core* model [12]

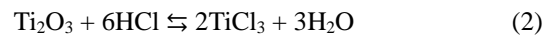
Reaksi yang terjadi antara ilmenit dengan HCl

ditunjukkan pada Gambar 3 [13].



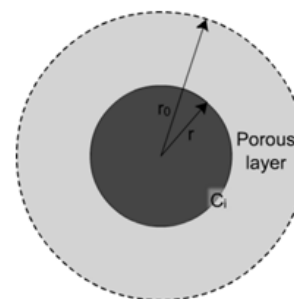
Gambar 3. Ilustrasi reaksi FeOTiO₂

Reaksi yang terjadi antara TiO₂ yang terkandung dalam ilmenit dengan HCl ditunjukkan pada Persamaan 2 [14].

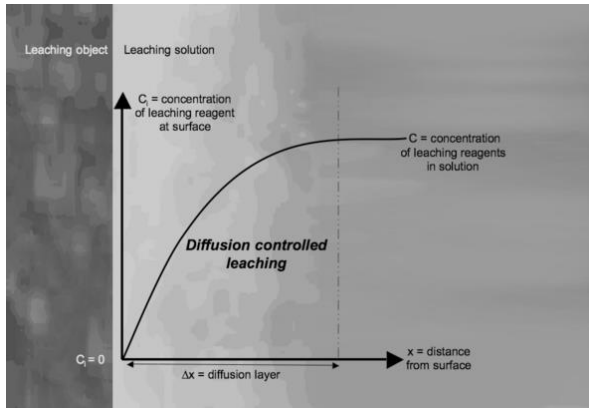


Pada penelitian ini dipelajari *shrinking particle* pada pelindian Ti dalam ilmenit memakai HCl [15-18]. Terjadinya reaksi dalam *pelindian* dapat dikontrol oleh peristiwa difusi dan peristiwa reaksi kimia yang ditampilkan pada Gambar 4 - 7 [19-23].

Diffusion-controlled leaching



Gambar 4. Skema pelindian melewati "*shrinking core*" model

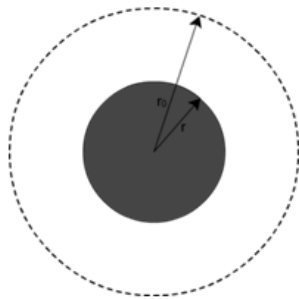


Gambar 5. Grafik hubungan antara lapisan difusi dengan konsentrasi pada pelindian menurut shrinking core model.

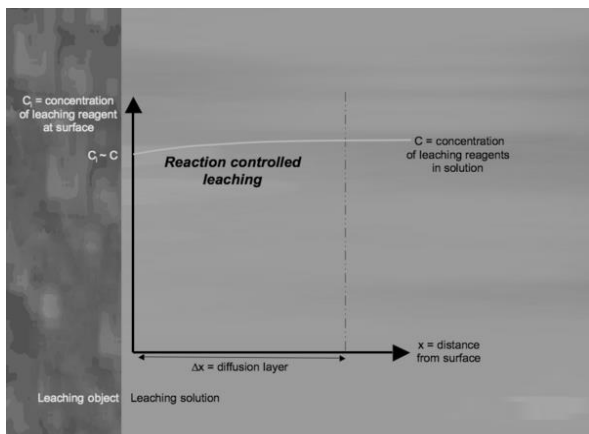
Shrinking core model

Reaktan mendifusi melalui lapisan yang porous.
 Konsentrasi reaktan pada permukaan = C_i , gmol/L
 Jari-jari awal = r_0 , cm
 Actual radius = r , cm

Reaction-controlled leaching



Gambar 6. Skema pelindian menurut “shrinking particle” model



Gambar 7. Grafik hubungan antara lapisan difusi dengan konsentrasi pada pelindian menurut shrinking particle model

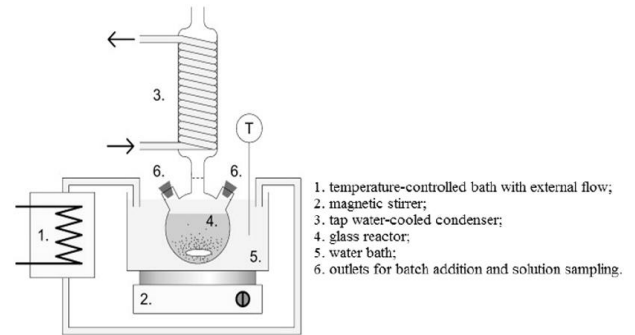
TATA KERJA

Bahan

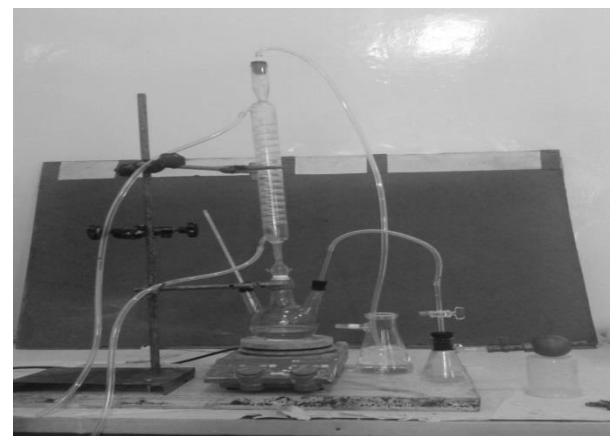
Bahan yang digunakan adalah ilmenit hasil tailing pasir zirkon, HCl teknis, air, TiO₂ E-Merck, Fe₂O₃ E-Merck, NbO₂ Merck, ZrO₂ Merck

Alat

Rangkaian peralatan pelindian, timbangan, oven, alat – alat gelas, spektrometer serapan atom(AAS) dan XRF



Gambar 8. Sketsa rangkaian peralatan pelindian



Gambar 9. Rangkaian peralatan pelindian yang dipakai

Cara kerja

Asam klorida (HCl) dengan molaritas 11 M sebanyak 250 ml dimasukkan dalam labu leher tiga, dipanaskan sampai suhu didih (100°C). Ilmenit sebanyak 50 g dimasukkan ke dalam labu dan diaduk, waktu pemanasan divariasi 50, 100, 150, 200 dan 250 menit. Uap dan gas yang terbentuk didinginkan dengan pendingin dan masuk kembali ke dalam labu (refluk), gas yang tidak mencair ditampung dalam wadah supaya tidak mencemari lingkungan. Setiap 50 menit, larutan hasil pelindian diambil sebanyak 5 mL (dari salah satu lobang labu dengan disedot/dipipet). Larutan cuplikan ini dianalisis mrmakai AAS. Setelah 250 menit, larutan dan padatan sisa pelindian disedot keluar, setelah dingin disaring. Padatan yang tersisa

dicuci, dikeringkan dan ditimbang, kemudian dianalisis memakai XRF. Pekerjaan diulangi untuk suhu 70; 80; 90; 100 dan 108°C.

Besaran yang diukur

- Kadar Ti dalam umpan /ilmenit (%) memakai XRF
- Berat unsur Ti dalam umpan (ilmenit) = kadar (%) x berat ilmenit (g)
- Mol unsur = berat unsur/BA unsur
- Berat TiO₂ dalam umpan = (BM TiO₂/BA unsurTi) x Berat unsur Ti dalam umpan
- Kadar TiO₂ dalam umpan (%) = (Berat TiO₂ dalam umpan/berat umpan) x 100%
- Mol TiO₂ = berat TiO₂/BM TiO₂ Kadar, berat dan mol Ti dan TiO₂ dalam larutan hasil pelindian
- Analisis kadar Ti dalam larutan hasil pelindian (ppm) memakai AAS
- Berat Ti dalam larutan hasil pelindian = kadar (ppm) x volume larutan hasil pelindian (250 mL)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konversi.

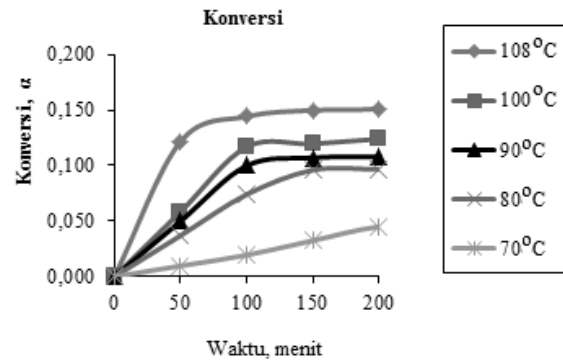
$$\text{Konversi } (\alpha)^{(24)} = \frac{\text{Berat Ti dalam larutan hasil pelindian}}{\text{Berat unsur Ti dalam umpan (ilmenit)}} \quad (3)$$

Penelitian yang dilakukan meliputi pencarian konversi (α), kinetika berdasarkan *shrinking core* model melalui analisis larutan hasil pelindian. Hasil yang diperoleh tertera pada grafik di bawah ini. Analisis hasil pelindian dengan AAS. Pada analisis ilmenit memakai XRF diperoleh hasil pada Tabel 2. Selain Ti dan Fe ternyata juga mengandung Zr dan Nb.

Tabel 2. Analisis ilmenit hasil tailing pasir zirkon

Kadar, %			
TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	NbO ₂
53,80	16,71	0,30	0,29

Pada Gambar 10 dapat dilihat, bahwa semakin lama waktu reaksi, konversi Ti semakin besar. Semakin lama waktu reaksi, reaksi yang terjadi semakin sempurna, sehingga senyawa TiO₂ semakin banyak yang mengalami proses pelindian. Dengan demikian konversi semakin besar dengan bertambahnya waktu reaksi. Pada variasi suhu mulai suhu 70°C sampai 108°C. Dengan kenaikan suhu reaksi, waktu yang diperlukan untuk mencapai konversi terbesar (yang sama) menjadi lebih cepat. Suhu reaksi akan sangat berpengaruh pada kesempurnaan reaksi. G.K. Das, Y. Pranolo, Z. Zhu, C.Y. Cheng⁽⁶⁾, melakukan pelindian ilmenit memakai larutan HCl, efisiensi Ti 94% dengan waktu pelindian 6 jam.



Gambar 10. Hubungan antara waktu dengan konversi pada berbagai suhu

Kinetika pelindian berdasarkan *shrinking core* model bisa terjadi dengan model (rumus) sebagai berikut [24]:

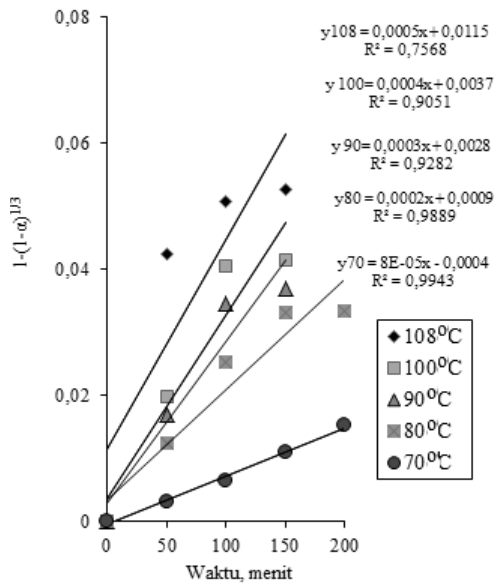
Tabel 3. Mekanisme yang terjadi pada pelindian dan persamaan reaksi

Mekanisme	Persamaan kinetika
<i>Sphere Reaction Controlled</i> (kontrol reaksi bentuk bola)	$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = \frac{k \cdot C}{r_0 \cdot \rho} t = k_1 t$ (4)
<i>Sphere Ash Diffusion Controlled</i> (kontrol difusi bentuk bola)	$1 - 2/3 \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = \frac{2 \cdot M \cdot C \cdot D}{\beta \cdot \rho \cdot r_0^2} t$ (5)
<i>Cylinder, Reaction Controlled</i> (kontrol reaksi bentuk silinder)	$1 - (1 - \alpha)^{1/2} = \frac{k \cdot C}{r_0 \cdot \rho} t$ (6)
<i>Cylinder, Ash Diffusion Controlled</i> (kontrol difusi bentuk silinder)	$\alpha + (1 - \alpha) \ln(1 - \alpha) = \frac{2 \cdot M \cdot C \cdot D}{\beta \cdot \rho \cdot r_0^2} t$ (7)

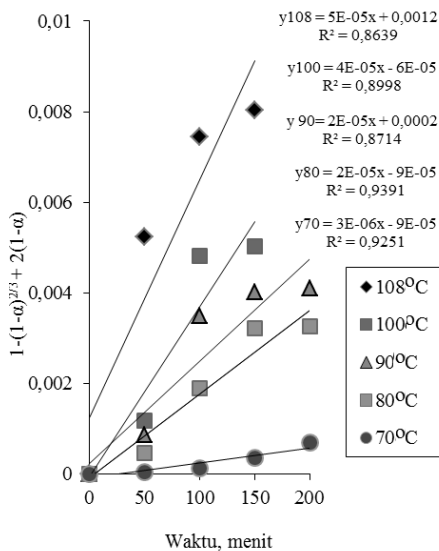
α = konversi atau fraksi yang terlindi,
 k = konstanta kecepatan reaksi, menit⁻¹
 C = konsentrasi reaktan, gmol/mL
 B = faktor stokiometri
 M = berat molekul
 ρ = densitas partikel, g/mL
 t = waktu pelindian, menit,
 D = konstanta difusi, g/cm² atau mole/cm²
 r_0 = jari – jari partikel awal (initial radius) pada saat waktu = 0

Jika proses pelindian dikontrol oleh reaksi bentuk bola dibuat hubungan antara waktu t dengan $1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ dan jika proses pelindian dikontrol oleh difusi pada partikel bentuk bola dibuat hubungan antara waktu t dengan $1 - 2/3 \alpha - (1 - \alpha)^{2/3}$. Gambar 11 adalah hubungan antara t dengan $1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ dan Gambar 12 hubungan antara waktu t dengan $1 - 2/3 \alpha - (1 - \alpha)^{2/3}$. Apabila nilai regresi linier (r) hubungan antara waktu t dengan $1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ cenderung mendekati 1, maka dapat dikatakan bahwa proses

pelindian dikontrol oleh reaksi kimia bentuk bola (*Sphere Reaction Control*). Tetapi bila nilai regresi linier (r) hubungan antara waktu t dengan $1-2/3 \alpha - (1-\alpha)^{2/3}$ cenderung mendekati 1, maka dapat dikatakan bahwa proses pelindian dikontrol oleh difusi bentuk bola (*Sphere "Ash" diffusion Control*)



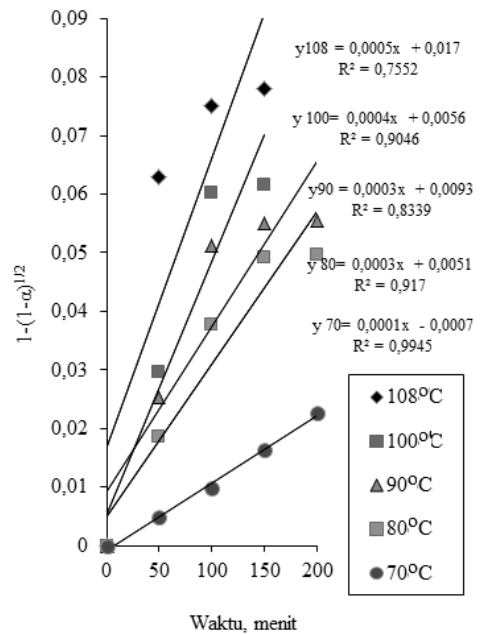
Gambar 11. Hubungan antara waktu t dengan $1 - (1-\alpha)^{1/3}$ pada kontrol reaksi bentuk bola



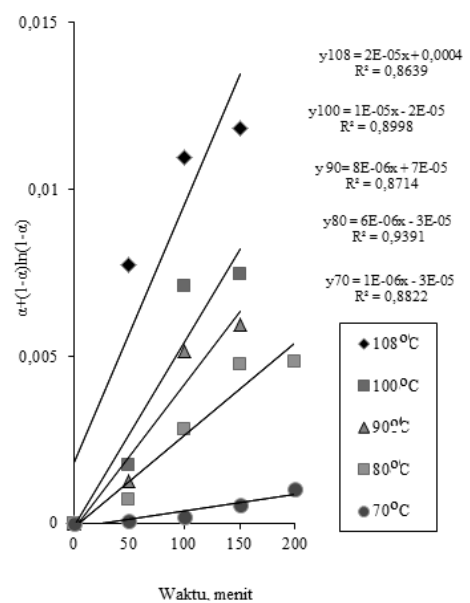
Gambar 12. Hubungan antara waktu t dengan $-2/3 \alpha - (1-\alpha)^{2/3}$ pada kontrol difusi bentuk bola

Selain model atau bentuk bola, proses pelindian bisa mengikuti bentuk silinder. Jika proses pelindian dikontrol oleh reaksi bentuk silinder dibuat hubungan antara waktu t dengan $1-(1-\alpha)^{1/2}$ dan jika proses pelindian dikontrol oleh difusi pada partikel bentuk silinder dibuat hubungan antara waktu t dengan $[\alpha+(1-\alpha)\ln(1-\alpha)]$.

Apabila nilai regresi linier (r) dari hubungan antara waktu t dengan $1-(1-\alpha)^{1/2}$ cenderung mendekati 1, maka dapat dikatakan bahwa proses pelindian dikontrol oleh reaksi kimia bentuk silinder (*cylinder reaction control*). Tetapi bila nilai regresi linier (r) hubungan antara waktu t dengan $[\alpha+(1-\alpha)\ln(1-\alpha)]$ cenderung mendekati 1, maka dapat dikatakan bahwa proses pelindian dikontrol oleh difusi bentuk silinder (*cylinder "Ash" diffusion control*).



Gambar 13. Hubungan antara waktu t dengan $1-(1-\alpha)^{1/2}$ pada kontrol reaksi bentuk silinder



Gambar 14. Hubungan antara waktu t dengan $1 + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$ pada kontrol difusi bentuk silinder.

Nilai persamaan regresi linier dan akar kuadrat R^2 (linearitas) pada berbagai mekanisme reaksi yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4. Dari Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa proses pelindian dikontrol oleh reaksi bentuk bola atau *Sphere Reaction*

Control, karena model *Sphere Reaction Control* rata-rata mempunyai harga linearitas (R^2) paling besar (mendekati 1) dibanding dengan model lainnya.

Tabel 4. Persamaan regresi linier dari akar kuadrat R^2 (linearitas) pada berbagai mekanisme reaksi

Suhu	Mekanisme reaksi			
	<i>Sphere Reaction Control</i>	<i>Sphere "Ash" diffusion Control</i>	<i>Cylinder Reaction Control</i>	<i>Cylinder "Ash" diffusion Control</i>
108°C	$y_{108} = 0,0005x + 0,0115$	$y_{108} = 5E-05x + 0,0012$	$y_{108} = 0,0005x + 0,017$	$y_{108} = 2E-05x + 0,0004$
	$R^2 = 0,7568$	$R^2 = 0,8639$	$R^2 = 0,7552$	$R^2 = 0,8639$
100°C	$y_{100} = 0,0004x + 0,0037$	$y_{100} = 4E-05x - 6E-05$	$y_{100} = 0,0004x + 0,0056$	$y_{100} = 1E-05x - 2E-05$
	$R^2 = 0,9051$	$R^2 = 0,8998$	$R^2 = 0,9046$	$R^2 = 0,8998$
90°C	$y_{90} = 0,0003x + 0,0028$	$y_{90} = 2E-05x + 0,0002$	$y_{90} = 0,0003x + 0,0093$	$y_{90} = 8E-06x + 7E-05$
	$R^2 = 0,9282$	$R^2 = 0,8714$	$R^2 = 0,8339$	$R^2 = 0,8714$
80°C	$y_{80} = 0,0002x + 0,0009$	$y_{80} = 2E-05x - 9E-05$	$y_{80} = 0,0003x + 0,0051$	$y_{80} = 6E-06x - 3E-05$
	$R^2 = 0,9889$	$R^2 = 0,9391$	$R^2 = 0,917$	$R^2 = 0,9391$
70°C	$y_{70} = 8E-05x - 0,0004$	$y_{70} = 3E-06x - 9E-05$	$y_{70} = 0,0001x - 0,0007$	$y_{70} = 1E-06x - 3E-05$
	$R^2 = 0,9943$	$R^2 = 0,9251$	$R^2 = 0,9945$	$R^2 = 0,8822$

Nilai konstanta kecepatan reaksi k merupakan slope dari persamaan garis lurus yang terbentuk. Daftar harga k setiap unsur pada berbagai suhu dapat dilihat pada Tabel 5.

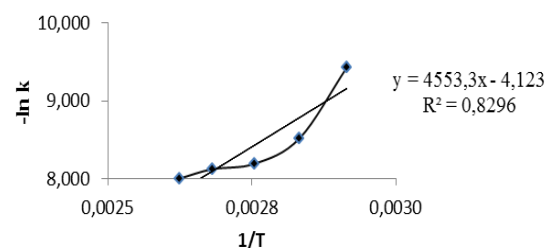
Tabel 5. Harga k pada berbagai suhu

Suhu	T	k , 1/menit
70	343	8E-05
80	353	0,0002
90	363	0,0003
100	373	0,0004
108	381	0,0005

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya suhu, konstanta kecepatan reaksi semakin besar atau reaksi melaju lebih cepat.

Setelah didapat nilai konstanta kecepatan reaksi pada tiap-tiap suhu, selanjutnya dapat dicari hubungan k konstanta kecepatan reaksi sebagai

fungsi suhu dengan mengacu pada persamaan Arrhenius, $\ln k = \ln A - E_a / R.T$. Hasil perhitungan dinyatakan dalam grafik garis lurus $\ln k$ sebagai ordinat dan $1/T$ sebagai absis yang dapat diamati pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik hubungan $1/T$ (Kelvin) dengan $-\ln k$

Dari Gambar 15 hubungan antara suhu ($1/T$) dengan $\ln k$, kelurusan garis dinyatakan dengan R^2 yang harganya = 0,8296 (mendekati 1), sehingga slope dan intersep yang diperoleh dapat mewakili falor frekuensi dan energi aktivasi. Persamaan garis $-\ln k = 4553,3/T - 4,123$ atau $\ln k = -4553,3/T + 4,123$

Energi aktivasi merupakan sebuah istilah yang diperkenalkan oleh Svante Arrhenius, yang didefinisikan sebagai energi yang harus dilampaui agar reaksi kimia dapat terjadi. Energi aktivasi bisa juga diartikan sebagai energi minimum yang dibutuhkan agar reaksi kimia tertentu dapat terjadi. Nilai faktor frekuensi (A) dapat ditentukan dari intersep dan energi aktivasi (E) merupakan harga slope dikalikan R (tetapan gas 8,314 J/mol. $^{\circ}$ K). Hasil perhitungan nilai A dan E dapat diamati pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai faktor frekuensi (A) dan Energi aktivasi (E)

Besaran	Nilai
E/R	4553,3
E, kJ/mol	37,856
$\ln A$	4,123
A (faktor frekuensi)	61,744

Faktor frekuensi (A) tergantung berat dan struktur molekul, frekuensi dan posisi tumbukan antar molekul. Energi aktivasi yang paling besar yaitu 37,856 kJ/mol. Persamaan hubungan antara k dengan T adalah $k = 61,744.e^{-4553,3/T}$

M.K. Sarker, A.K.M.B. Rashid, , A.S.W⁽¹⁷⁾. Kurny mengambil waktu hanya sampai 2 jam untuk data kinetika, membandingkan *first order reaction* model $F_1 = -\ln(1-\alpha) = kt$, *spherical model*, $R_2 = [1 - (1-\alpha)^{1/3}] = (k/r^2)t$ dan *Ginstling-Brounshtein reaction*, $R_3 = 1 - (2/3)\alpha - (1-\alpha)^{2/3} = kt$ diperoleh energi aktivasi pelindian 43 kJ/mol. V.S. Gireesh¹, , V.P. Vinod, S. Krishnan Nair, Georgee Ninan [25], memperoleh konstanta kecepatan tertinggi sebesar $5.18 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ pada pelindian ilmenit dengan 30% HCl, kecepatan pengadukan 700 rpm dan suhu 70 $^{\circ}$ C. Setelah dilakukan perhitungan entalpi reaksi (ΔH) sebesar 24.157 kJ/mol dan entropi reaksi (ΔS) sebesar 26.25 J/mol/K. Suchun Zhang, Michael J. Nicol [26] menyimpulkan bahwa kinetika pelarutan ilmenite memakai HCl mengikuti *shrinking particle model* dengan kecepatan pelarutan dikontrol oleh reaksi kimia lambat (*slow chemical reaction*) dengan energi aktivasi of 75.0 kJ mol⁻¹. Persamaan reaksi $1 - (1-X)^{1/3} = k_s t$, $k_s = 1,97.10^7 .r_0^{-0,27}Ca^{0,75} \exp(-9026/T)$

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian *pelindian* Ti dalam ilmenit memakai HCl, dapat diambil kesimpulan bahwa

pada *pelindian* 50 g ilmenit memakai 11 M HCl semakin tinggi suhu *pelindian*, konversi Ti semakin besar. Mekanisme proses pelindian dikontrol oleh *Sphere Reaction* dengan rumus $1 - (1-\alpha)^{1/3} = \frac{k.C}{r_0.P} t = k_1 t$, hubungan antara suhu (T) dengan tetapan laju reaksi (k), $k = 61,744.e^{-4553,3/T}$ atau $\ln k = -4553,3/T + 4,123$, faktor frekuensi A = 61,744, energi aktivasi E = 37,856 kJ/mol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Suprihati yang telah membantu penelitiannya dan penelitian ini atas biaya SINas tahun 2014.

DAFTAR PUSTAKA

- L.D. Setiawati, T.P. Rahman, D.W. Nugroho, Nofrizal, R. Ikono, Suryandaru, Yuswono, Siswanto, N.T. Rochman, *Ekstraksi Titanium Dioksida (TiO₂) dari Pasir Besi dengan Metode Hidrometalurgi*, Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung 465 – 468, 2013.
- Rio Tinto, *Consumption of Pigment by end-use industries*, http://www.riotinto.com/documents/MediaSpeeches/QMM_presentationGary O Brien.pdf, diakses 5 Januari 2013.
- Nowotny, J, *Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion: Titanium Dioxide*. CRC Press. p. 156. ISBN 9781439848395, 2011.
- H. Poernomo, Sajima, *Kajian Teknologi Pengelolaan Limbah TENORM pada Proses Pengolahan Pasir Zirkon*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PTAPB-Batan, Yogyakarta, 118 – 123, 2013.
- A.A. Baba, F.A. Adekola, O.A. Arodola, L. Ibrahim, R.B. Bale, M.K. Ghosh, A.R. Sheik, *Simultaneous Recovery of Total Iron and Titanium from Ilmenite Ore by Hydrometallurgical processing*, Department of Chemistry, PMB, University of Ilorin, Nigeria, 2011.
- G.K. Das, Y. Pranolo, Z. Zhu, C.Y. Cheng, *Leaching of Ilmenit by Acidic Chloride Solutions*, Hydrometallurgy 133, 94-99. 2013.
- Tao T, Chen Q, Hu H, Yin Z, Chen Y, *TiO₂ nanoparticles prepared by hydrochloric acid leaching of mechanically activated and carbothermic reduced ilmenite*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 22, Issue 5, Pages 1232-1238, May 2012.

8. Tan P, Hu H, Zhang L, *Effects of mechanical activation and oxidation-reduction on hydrochloric acid leaching of Panxi ilmenite concentration*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 21, Issue 6, , Pages 1414-1421, June 2011.
9. Feixiang W, Xinhai L, Zhixing W, Ling W, HuaJun G, Xunhui X, Xiaoping Z, Xiaojuan W, *Hydrogen peroxide leaching of hydrolyzed titania residue prepared from mechanically activated Panzhihua ilmenite leached by hydrochloric acid*, International Journal of Mineral Processing, Volume 98, Issues 1–2, 17, Pages 106-112, January 2011.
10. Li Z, Huiping H, Zhi L, Qiyuan C, Jun T, *Hydrochloric acid leaching behavior of different treated Panxi ilmenite concentrations*, Hydrometallurgy, Volume 107, Issues 1–2, , Pages 40-47, April 2011.
11. Li Z, Huiping H, Liangping W, Qiyuan C, Jun T, *Hydrochloric acid leaching behaviour of mechanically activated Panxi ilmenite (FeTiO₃)*, Separation and Purification Technology, Volume 73, Issue 2, 18, Pages 173-178, June 2010.
12. Vida S^a, Gilnaz A^a, Fereshteh R^b, Navid M^a, *A shrinking particle—shrinking core model for leaching of a zinc ore containing silica*, International Journal of Mineral Processing Volume 93, Issue 1, 1, Pages 79–83, September 2009.
13. Sneha S, *Preparation of synthetic rutile from pre-treated ilmenite/Ti-rich slag with phenol and resorcinol leaching solutions*, Hydrometallurgy, Volume 137, Pages 8–12, May 2013.
14. EL-Hazek^a, N, Lasheen^a, T.A, R. EL-Sheikh^b, R., SALAH A. Z^a, *Hydrometallurgical criteria for TiO₂ leaching from Rosetta ilmenite by hydrochloric acid*, Hydrometallurgy, Volume 87, Issues 1–2, Pages 45–50, June 2007.
15. Olanipekun, E., *A kinetic study of the leaching of a Nigerian ilmenite ore by hydrochloric acid*, Hydrometallurgy, Volume 53, Issue 1, Pages 1-10, July 1999.
16. Dyk, J. P ., Nanne M V, Pistorius, P.C, *Kinetics of ilmenite dissolution in hydrochloric acid*, Hydrometallurgy, Volume 65, Issue 1, Pages 31-36, July 2002.
17. Sarker, M.K. , Rashid, A.K.M.B. , Kurny, A.S.W., *Kinetics of leaching of oxidized and reduced ilmenite in dilute hydrochloric acid solutions*, International Journal of Mineral Processing, Volume 80, Issues 2–4, Pages 223-228, September 2006.
18. Zhu, Q., Zhang, J. Li, H., *Influence of Phase and Microstructure on The Rate of Hydrochloric Acid leaching in Pretreated Panzhihua Ilmenite*, Particuology, Volume 14, 83-90, June 2014.
19. Singer, P. C. & Stumm, W. *Acid mine drainage: The rate determining step*. Science, 167, 1121-1123. 1970.
20. Geankoplis, C. *Transport Process and Separation Principles*. NJ: Prentice Hall. 2004, pp. 802–817. ISBN 978-0-13-101367-4.
21. Seader and Henley, J.D. and Ernest J., *Separation Process Principles*. U.K: John Wiley & Sons inc. pp. 639–641. ISBN 978-0-471-46480-8, 2001.
22. Li, L; Jing G; Renjie C; Feng W; Shi C; Xiaoxiao Z., (March 16, 2010), *Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery*. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology. Waste Management **30** (12): 2615–2621. doi:10.1016/j.wasman.2010.08.008. Retrieved Nov 2011.
23. Li, L; Jing G; Renjie C; Feng W; Shi C; Borong W (2010-04-15). *Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant*. Journal of Hazardous Materials **176** (1-3): 288–293. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.11.026. Retrieved Nov 2011.
24. KNona C. Liddell , *Shrinking core models in hydrometallurgy: What students are not being told about the pseudo-steady approximation*, Hydrometallurgy, Volume 79, Issues 1–2, Pages 62–68, Teaching and Learning Hydrometallurgical Science and Engineering-Part I, September 2005.
25. V.S. Gireesh, V.P. Vinod, S. Krishnan Nair, Georgee Ninan, *Catalytic leaching of Ilmenite Using Hydrochloric Acid: A kinetic approach*, International Journal of Mineral Processing, Volume 134, 10 36-40, January 2015.
26. Suchun Z, Michael J. N *Kinetics of the dissolution of ilmenite in sulfuric acid solutions under reducing conditions*, Hydrometallurgy, Volume 103, Issues 1–4, , Pages 196–204, June 2010.

TANYA JAWAB**Wibisono**

- Apakah data pada grafik linieritas pada suhu 108 °C di tentukan secara analitik untuk menentukan nilai korelasinya (R^2) menggunakan 3 data atau 4 data pengukuran.

MV. Purwani

- Karena pada hubungan antara waktu dengan konversi (α) menunjukkan hasil yang konstan pada waktu di atas 60 menit, maka dipilih harga konversi sebelum stagnan. Pada penelitian lanjut dicari hubungan antara waktu dengan konversi dengan skala waktu yang lebih pendek supaya mendapat hasil yang lebih valid.