

## KINETIKA REAKSI PEMISAHAN Zr – Hf PADA EKSTRAKSI CAIR – CAIR DALAM MEDIA ASAM NITRAT

Kris Tri Basuki\*, Dwi Biyantoro\*\*

\*Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir – BATAN, Yogyakarta

\*\*Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN, Yogyakarta

e-mail: kristri\_basuki@batan.go.id

(Diterima 12-4-2011, disetujui 23-5-2011)

### ABSTRAK

**KINETIKA REAKSI PEMISAHAN Zr – Hf PADA EKSTRAKSI CAIR-CAIR DALAM MEDIA ASAM NITRAT.** Telah dilakukan penelitian kinetika reaksi pemisahan Zr-Hf pada ekstraksi cair-cair dalam media asam nitrat. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan kinetika ekstraksi cair-cair pada pemisahan Zr-Hf yaitu konstanta kecepatan reaksi, konstanta Arrhenius, dan energi aktivasi. Penelitian dilakukan dengan cara mencampurkan zirkonil nitrat dengan TBP-kerosen dengan perbandingan tertentu ke dalam bejana berpengaduk dan dipanaskan. Cuplikan filtrat fase air dianalisis menggunakan alat pendar sinar-X. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinetika ekstraksi mengikuti reaksi orde satu dengan konstanta kecepatan reaksi,  $k = 2,242 e^{-20,8/T}$  menit<sup>-1</sup>, energi pengaktif (E) sebesar 590,150 kal/mol dan konstanta Arrhenius (A) sebesar 0,8075 menit<sup>-1</sup> dengan persamaan kecepatan reaksi:  $-r_A = 2,2423 e^{-0,0208} C_A$

**KATA KUNCI:** kinetika reaksi, ekstraksi, TBP, zirkonium, hafnium

### ABSTRACT

**REACTION KINETIC OF SEPARATION OF Zr – Hf IN LIQUID - LIQUID EXTRACTION IN ACID NITRATE MEDIA.** The reaction kinetic of Zr-Hf separation in liquid-liquid extraction in nitric acid media has been studied. This research was done to determine the kinetic of liquid-liquid extraction in the separation of Zr-Hf which consists of the reaction rate constant, Arrhenius constant, and activation energy. The research carried out by mixing zirconil nitrate with TBP-kerosene with a certain ratio into a stirred vessel and heated. Filtered samples of the water phase were analyzed using X-ray fluorescence instrument. The results showed that the kinetic of extraction followed the first order reaction with reaction rate constant,  $k = 2.242 e^{-20,8/T} \text{ min}^{-1}$ , activation energy (E) = 590.1501 cal/mol and Arrhenius constant (A) = 0.8075 min<sup>-1</sup> with the reaction rate equation:  $-r_A = 2.2423 e^{-0,0208} C_A$ .

**FREE TERMS:** reaction kinetic, extraction, TBP, zirconium, hafnium

## I. PENDAHULUAN

Pasir zirkon ( $ZrSiO_4$ ) di Indonesia banyak terdapat di pulau Bangka, Belitung, dan Kalimantan. Pulau Bangka adalah salah satu daerah yang mempunyai sumber daya mineral pasir zirkon dengan kadar zirkonium (Zr) sekitar 40% dengan pengotor antara lain: hafnium (Hf) = 1,39%, silikon (Si) = 20,75% dan timah (Sn) = 1,27%<sup>[1]</sup>.

Kegunaan utama mineral zirkon ( $ZrSiO_4$ ) yaitu sebagai penghasil logam Zr yang dapat digunakan sebagai refraktori dan keramik. Zirkonium digunakan secara luas di industri kimia pada pipa yang terletak di lingkungan korosif terutama pada temperatur tinggi. Zirkonium dapat menyerap panas yang lebih rendah sehingga industri tenaga nuklir menggunakan Zr sebagai pemantul dalam reaktor nuklir. Logam Zr digunakan dalam teras reaktor nuklir karena tahan korosi dan tidak menyerap neutron<sup>[2]</sup>.

Zirkonium yang digunakan dalam bidang nuklir haruslah memenuhi persyaratan sebagai Zr berderajat nuklir yang mempunyai nilai strategis. Oleh karena itu, Zr agar dapat dipakai sebagai bahan strategis dalam industri nuklir Zr harus bersih dari pengotornya terutama Hf karena mempunyai penampang lintang penyerap netron yang tinggi yaitu 102 barn, yang biasanya digunakan sebagai batang kendali dalam reaktor nuklir<sup>[3]</sup>.

Pemakaian Zr kualitas tinggi sampai saat ini masih tergantung pada produk impor, pasir zirkon ( $ZrSiO_4$ ) sebagai sumber utama Zr memiliki potensi cadangan di Indonesia yang cukup besar. Pasir Zirkon ( $ZrSiO_4$ ) yang terdapat dalam jumlah banyak di Kalimantan Selatan sampai saat ini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Namun potensi yang cukup besar ini belum disertai dengan pemanfaatan dan pengolahan yang optimal untuk menghasilkan produk yang mempunyai nilai tambah<sup>[4,5]</sup>.

Zirkonium dalam bahan bakar nuklir diperlukan karena mempunyai beberapa keunggulan antara lain: penampang lintang serapan netron rendah (0,185 barn), tahan panas, tahan korosi, dan mempunyai sifat mekanik yang baik. Keunggulan ini menyebabkan ZrC berpotensi menggantikan SiC sebagai pelapis uranium (bahan bakar reaktor bentuk kernel). Untuk memperoleh Zr derajat nuklir dengan kandungan pengotor Hf maksimal 100 ppm maka diperlukan teknologi pemisahan antara Zr dan Hf yang tepat. Metode pemisahan Zr-Hf yang masih dan terus dikembangkan adalah proses ekstraksi karena proses lebih efisien, efektif dan dipakai untuk meningkatkan produksi<sup>[5]</sup>.

Metode ekstraksi cair-cair terus dikembangkan untuk membuat proses ekstraksi lebih efisien, efektif, dan dipakai untuk meningkatkan produksi, melalui antara lain: a) pengembangan pelarut baru agar lebih selektif terhadap ion tertentu, b) pemakaian kembali pelarut ke dalam proses, sehingga dapat menghemat biaya, c) peningkatan unjuk kerja proses agar kebutuhan energi yang lebih rendah, d) peralatan yang lebih kecil, e) kebutuhan bahan pelarut yang lebih hemat, dan f) limbah yang lebih sedikit<sup>[5,6]</sup>.

Tujuan penelitian ini adalah mencari kondisi terbaik proses ekstraksi pemisahan Zr-Hf dalam rangka penentuan kinetika reaksi, yaitu konstanta kecepatan reaksi, konstanta Arrhenius dan energi aktivasi. Penentuan kinetika reaksi diperlukan untuk perancangan alat dalam rangka peningkatan kapasitas produksi.

## II. TEORI

Ekstraksi adalah proses pemisahan satu atau lebih komponen dari suatu campuran homogen menggunakan pelarut cair (solven) berdasarkan prinsip beda kelarutan. Ekstraksi dapat dipakai untuk memisahkan dari kadar rendah sampai dengan kadar tinggi. Ekstraksi cair-cair atau sering disebut ekstraksi saja.

Pemisahan Zr dan Hf pada proses ekstraksi cair-cair (reaksi homogen) dapat dikerjakan dengan mengubah logam tersebut menjadi senyawa kompleks yang dapat larut dalam fase organik. Fase organik ini mempunyai gugus ligan yang dapat bereaksi selektif terhadap salah satu atau beberapa unsur logam yang ada dalam fase air. Terpisahnya unsur-unsur logam ini karena perbedaan reaktifitas dan difusifitas masing-masing unsur logam terhadap fase organik.

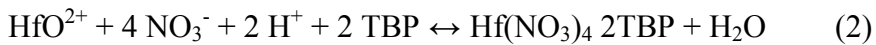
Laddha, 1976 mengatakan bahwa ekstraksi lebih ekonomis dipakai dibandingkan dengan proses lain, antara lain pada pemisahan campuran bahan dengan sifat kimia yang mirip antara yang satu dengan yang lain dibandingkan daripada proses distilasi<sup>[7]</sup>.

Pada proses ekstraksi cair-cair pemilihan solven sangat penting dilakukan, hal ini dikarenakan solven berperan dalam kecepatan pemisahan, peningkatan efisiensi, dan faktor pemisahan<sup>[7]</sup>. Pada proses pemisahan ada beberapa solven yang dapat dipakai pada proses ekstraksi antara lain: TBP, D<sub>2</sub>EHPA, metil isobutil ketone (MIBK), 3-fenil-4-alkil-5-isoxazolone, dan cianex. Untuk meningkatkan efisiensi pemisahan diperlukan hidrokarbon alifatik seperti kerosen, dodekan, n heptan, toluen, dan atau *xylene* dengan tujuan agar ekstraksi lebih mudah dikontrol, mengurangi berat jenis,

menurunkan viskositas, mengurangi massa jenis, dan memperbaiki sifat hidrofiliknya, sehingga memperbesar kemampuan ekstraktan untuk membentuk kompleks dengan Zr.

Pada riset ini digunakan solven TBP dalam larutan umpan zirkonil nitrat karena terjadi kontak antar fase yang baik. TBP relatif lebih mudah mengekstrak Zr dibandingkan dengan Hf. Solven MIBK lebih cocok untuk mengekstrak Hf. Pengencer kerosen dalam TBP dipilih karena dapat meningkatkan efisiensi pemisahan Zr dan memperbesar kemampuan ekstraktan dalam membentuk kompleks dengan Zr.

Reaksi ekstraksi pemisahan Zr-Hf ditulis<sup>[8,9]</sup>:



dapat pula ditulis dalam bentuk:



dengan:

A : zirkonil nitrat

B : TBP

Untuk mencari beberapa parameter kinetika dari reaksi tersebut, menurut Levenspiel (1972) dapat dibuat model reaksi yaitu sebagai berikut:

Apabila reaksi dianggap orde satu terhadap konsentrasi asam nitrat karena umpan suasana asam (zirkonil nitrat), maka persamaan dapat ditulis:

$$(-r_A) = \frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (4)$$

Jika konsentrasi dinyatakan dalam konversi X, kemudian diintegral akan didapatkan:

$$-\ln(1 - X_A) = kt + I \quad \text{atau} \quad X_A = 1 - e^{-kt} \quad (5)$$

dengan X adalah konversi yang menunjukkan fraksi reaktan yang berubah menjadi hasil. Dalam hal ini,

- $r_A$  : kecepatan reaksi  
 $C_A$  : konsentrasi Zr (mol/ml)  
 $I$  : konstanta integrasi

Dari persamaan (5) apabila dibuat grafik antara  $-\ln(1 - X_A)$  dengan  $t$  akan didapatkan garis lurus dengan kemiringan yang menyatakan nilai konstanta kecepatan reaksi ekstraksi untuk reaksi orde satu.

Percobaan dengan variasi suhu menghasilkan persamaan Arrhenius. Salah satu hal penting yang mengendalikan proses ekstraksi adalah kecepatan reaksi. Kecepatan reaksi dapat dinyatakan sebagai kecepatan berkurangnya konsentrasi pereaksi atau bertambahnya konsentrasi produk (hasil reaksi) persatuan waktu. Semakin cepat reaksi terjadi maka proses akan semakin cepat.

Nilai konstanta kecepatan reaksi kimia ( $k$ ) dapat dicari dengan persamaan Arrhenius<sup>[10,11,12]</sup> yaitu dalam bentuk:

$$k = Ae^{-E/RT} \text{ atau } \ln k = \ln A - E/(RT) \quad (6)$$

atau

$$\ln k = \ln A - E/R (1/T) \quad (7)$$

dengan,

- $k$  : konstanta kecepatan reaksi kimia  
 $A$  : konstanta Arrhenius (disebut juga faktor frekuensi)  
 $E$  : energi aktivasi, kal/mol.  
 $R$  : konstanta gas umum, 1,987 kal/mol K  
 $T$  : suhu mutlak, K

Berdasarkan data hubungan  $\ln k$  dengan  $(1/T)$  nilai faktor frekuensi ( $A$ ) dan tenaga pengaktif ( $E$ ) dapat dihitung.

### III. TATA KERJA

Bahan baku yang digunakan adalah zirkon oksid klorid hasil proses pengolahan pasir zirkon, asam nitrat, tributil fosfat (TBP), di-etilheksil fosforik asid ( $D_2EHPA$ ), kerosen dan aquades.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah gelas beker, gelas ukur, pipet, penjepit, pengaduk, alat spektrometer pendar sinar-X, merk EG & G ORTEC 7010, analisis pengaktifan netron (APN), pengaduk

magnet merk Stuart Scientific, timbangan analitik merk Sartorius, corong pisah, termometer (0-100 °C).

Umpan zirkonil nitrat dibuat dengan cara melarutkan  $ZrOCl_2$  dengan asam nitrat (fase air) pada berbagai keasaman (1 N  $HNO_3$ ; 2; 3; 4; dan 5 N  $HNO_3$ ), kemudian dianalisis. Larutan fase organik dibuat dengan perbandingan 40% TBP dan 60% kerosen. Larutan zirkonil nitrat (larutan umpan) pada keasaman 1 N  $HNO_3$ , dicampur dengan fase organik (FO) dengan perbandingan = 1 : 1. Campuran kemudian dipisahkan antara ekstrak (fase organik) dan rafinat (fase air). Seperti percobaan di atas dilakukan untuk keasaman 2 N dan seterusnya sampai 5 N  $HNO_3$ . Untuk mengetahui kadar Zr dan Hf, rafinat dianalisis. Analisis unsur Zr menggunakan alat pendar sinar-X sedang unsur Hf menggunakan APN. Percobaan dengan pengaruh suhu dilakukan pada berbagai waktu dengan cara memvariasikan pada berbagai suhu, mulai 30 °C; 40 °C; dan 50 °C dan waktu 10 menit, 20, dan 30 menit pada keasaman umpan yang optimum.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengaruh konsentrasi asam nitrat

Umpan zirkonil nitrat sebanyak 25 mL dicampur dengan 40% TBP-60% kerosen dengan perbandingan volum = 1 : 1, kecepatan pengadukan = 200 rpm, waktu pengadukan = 15 menit.

Hasil percobaan pada berbagai keasaman (1 N  $HNO_3$ , 2, 3, 4, dan 5  $HNO_3$ ) ditunjukkan dalam Tabel 1 sampai dengan Tabel 5.

Tabel 1. Hubungan antara tahap ekstraksi dengan kadar Zr memakai TBP pada 1 N  $HNO_3$  dan 40% TBP-60% kerosen, umpan Zr = 19171 ppm

Ekstraksi tahap	Kadar Zr dalam fase air, ppm	Koefisien distribusi (Kd) Zr
I	17969	0,06689
II	17864	0,00588
III	16379	0.09066

Tabel 2. Hubungan antara tahap ekstraksi dengan kadar Zr memakai TBP pada 2 N  $HNO_3$  dan 40% TBP-60% kerosen, umpan Zr = 15987 ppm

Ekstraksi tahap	Kadar Zr dalam fase air, ppm	Koefisien distribusi (Kd) Zr
I	15442	0,03529
II	15142	0,01981
III	14241	0,06327

Tabel 3. Hubungan antara tahap ekstraksi dengan kadar Zr memakai TBP pada 3 N HNO<sub>3</sub> dan 40% TBP-60% kerosen, umpan Zr = 15933 ppm

Ekstraksi tahap	Kadar Zr dalam fase air, ppm	Koefisien distribusi (Kd) Zr
I	14732	0,08152
II	12891	0,14281
III	10032	0,28499

Tabel 4. Hubungan antara tahap ekstraksi dengan kadar Zr memakai TBP pada 4 N HNO<sub>3</sub> dan 40% TBP-60% kerosen, umpan Zr = 17735 ppm

Ekstraksi tahap	Kadar Zr dalam fase air, ppm	Koefisien distribusi (Kd) Zr
I	14432	0,22887
II	10271	0,40512
III	6484	0,58405

Tabel 5. Hubungan antara tahap ekstraksi dengan kadar Zr memakai TBP pada 5 N HNO<sub>3</sub> dan 40% TBP-60% kerosen, umpan Zr = 16538 ppm

Ekstraksi tahap	Kadar Zr dalam fase air, ppm	Koefisien distribusi (Kd) Zr
I	14239	0,16146
II	13994	0,01751
III	13699	0,02153

Kadar Hf dalam umpan dan kadar Hf dalam rafinat fase air ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kadar Hf dalam umpan dan kadar Hf hasil ekstraksi menggunakan 40% TBP dan 60% kerosen.

4 N HNO <sub>3</sub>	Kadar Hf dalam umpan (g/L)	Kadar Hf dalam rafinat (g/L)
I	0,22	0,16

Dari hasil yang disajikan dalam Tabel 1 sampai dengan Tabel 5 menunjukkan bahwa pada ekstraksi pemisahan Zr-Hf memakai ekstraktan 40% TBP-60% kerosen relatif baik memakai 4 N HNO<sub>3</sub> karena Zr relatif lebih banyak yang terikat dalam fase organik. Tahap ekstraksi atau ekstraksi berkelanjutan dapat meningkatkan nilai Kd Zr, seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Hal ini menunjukkan bahwa pada pemurnian Zr diperlukan proses ekstraksi *multi stage*.

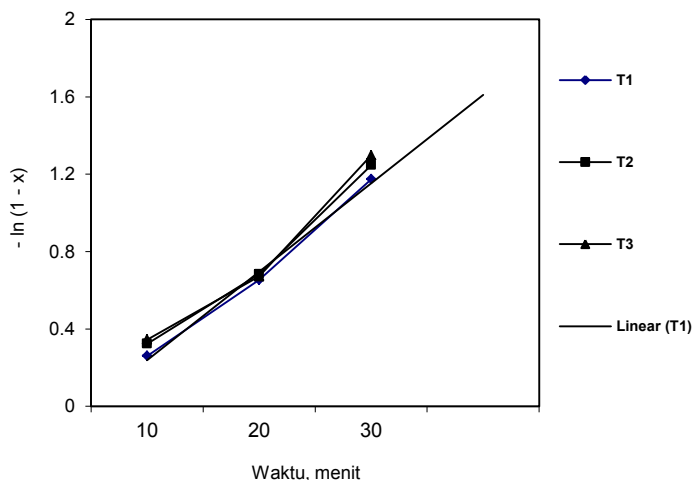
Berdasarkan data hasil penelitian kemudian dipakai mencari orde reaksi yang berguna untuk mengetahui persamaannya kinetiknya.

#### 4.2. Pengaruh suhu pada berbagai waktu ekstraksi

Umpan zirkonil nitrat 4 N sebanyak 25 mL dicampur dengan 40% TBPP-60% kerosen dengan perbandingan volum = 1 : 1, kecepatan pengadukan = 200 rpm, waktu pengadukan = 10 menit, 20 menit, dan 30 menit.

Untuk mempelajari pengaruh suhu terhadap konstanta kecepatan reaksi, dibuat grafik hubungan antara  $-\ln(1 - X)$  terhadap waktu pada berbagai suhu seperti terlihat pada Gambar 1. Ternyata titik-titik yang diperoleh merupakan garis lurus, dan nilai konstanta kecepatan reaksi dapat dicari dengan cara kuadrat terkecil nilai-nilai konstanta kecepatan reaksi ( $k$ ) dan konstanta integrasi ( $I$ ) pada berbagai suhu disajikan dalam Gambar 1.

Hasil percobaan pada berbagai waktu dan suhu : 30 °C (303 K), 40 °C (313 K), dan 50 °C (323 K) disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan antara waktu versus  $-\ln(1 - x)$  pada suhu 303 K , 313 K, dan 323 K

Persamaan regresi yang diperoleh dari Gambar 1 pada suhu 303 K adalah :  $y = 0,456 x - 0,227$  dengan  $R^2 = 0,987$ . Nilai  $R^2$  mendekati nilai ( $\approx$ ) 1 maka reaksi terjadi pada reaksi orde satu, dengan tangen arah, yaitu konstanta kecepatan reaksi ( $k$ ) sebesar  $0,456 \text{ menit}^{-1}$ , dan perpotongan dengan sumbu tegak konstanta integrasi ( $I$ ) sebesar  $- 0,227$ . Kecepatan reaksi kimia berbanding lurus dengan konsentrasi reaktan.



Seperti percobaan yang dijalankan pada suhu 313 K, persamaan regresi yang diperoleh adalah :  $y = 0,461 x - 0,172$  dengan  $R^2 = 0,984$ . Nilai  $R^2$  mendekati nilai ( $\approx$ ) 1 berarti reaksi terjadi pada reaksi orde satu.

Untuk pekerjaan yang dijalankan pada suhu 323 K, persamaan regresi yang diperoleh adalah :  $y = 0,476 x - 0,181$  dengan  $R^2 = 0,968$ . Nilai  $R^2$  mendekati nilai ( $\approx$ ) 1 berarti reaksi terjadi pada reaksi orde satu.

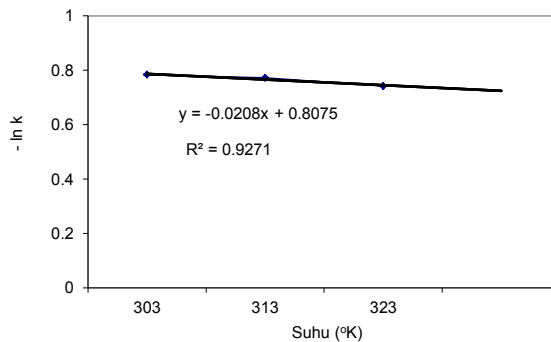
Selanjutnya bila  $-\ln k$  digambarkan terhadap  $(1/T)$  K, diperoleh garis lurus seperti disajikan pada Gambar 2 di bawah. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi pada kisaran yang diteliti mengikuti persamaan Arrhenius. Dengan demikian, penyelesaian persamaan menjadi:  $y = - 0,020 x + 0,807$  dengan  $R^2 = 0,927$ . Percobaan dilakukan hanya sampai 50 °C dengan pertimbangan bahan-bahan organik pada suhu tinggi akan lebih mudah rusak. Seperti pada ekstraksi menggunakan ekstrak *cyanex 272*, pengaruh suhu yang semakin tinggi bisa meningkatkan nilai faktor pemisahan Co-Ni, percobaan dibatasi hanya sampai suhu maksimal 60 °C<sup>[13]</sup>.

Dari hasil perhitungan pengaruh suhu terhadap konstanta kecepatan reaksi pada berbagai suhu dapat disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengaruh suhu terhadap nilai k

Suhu, K	$10^3 / K$	K	$-\ln k$
303 K	3,3003	0,4569	0,7833
313 K	3,1949	0,4618	0,7726
323 K	3,0960	0,4763	0,7417

Berdasarkan Gambar 1, 2 dan 3 diketahui bahwa hubungan  $\ln(1 - X)$  dengan waktu mendekati persamaan linier yang ditandai dengan nilai  $R^2$  mendekati nilai 1.



Gambar 4. Hubungan antara suhu terhadap nilai  $-\ln k$

Persamaan Arrhenius dalam bentuk linier adalah:

$$\begin{aligned}
 - \ln k &= 0,807 - 0,020 (1/T) \\
 k &= 2,242 e^{-0,020 \times 1000/T} \\
 k &= 2,242 e^{-20,8/T}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$k = Ae^{-E/RT} \text{ atau } \ln k = \ln A - E/(RT)$$

$$E/R (1/T) = - \ln k + \ln A$$

Tabel 8. Pengaruh suhu terhadap nilai Energi pengaktif (E)

Suhu (K)	- ln k	E
303	0,783	577,782
313	0,772	592,842
317	0,741	599,819
Nilai rata-rata		590,150

Nilai E rata-rata = 590,150 kal/mol

Nilai A = 0,807 menit<sup>-1</sup>

Persamaan kecepatan reaksi:  $(-r_A) = \frac{dC_A}{dt} = kC_A$

$$(-r_A) = 2,2423 e^{-0,0208} C_A$$

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa kecepatan reaksi pemisahan Zr-Hf pada ekstraksi cair-cair dalam media asam nitrat adalah sebagai berikut:

1. Kinetika reaksi ekstraksi cair-cair mengikuti reaksi orde satu karena nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) mendekati nilai 1.
2. Nilai konstanta kecepatan reaksi terhadap suhu mengikuti persamaan:
  - $\ln k = 0,807 - 0,020 (1/T)$  dengan energi aktivasi (E) = 590,150 kal/mol,
  - konstanta Arrhenius (A) = 0,807 menit<sup>-1</sup>, dan kecepatan reaksi
  - $r_A = 2,242 e^{-0,020} C_A$ .

## VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Purwoto, Sudarso, R. Sudibyo, dan Murdani Sumarsono atas segala bantuannya dalam penelitian di laboratorium.

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. Dwi Biyantoro dan Muhadi A.W., (2010). Kajian Pemisahan Zr-Hf Dengan Proses Ekstraksi Cair-Cair, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
  2. Mark, Winter. (2000). Zirconium: The Essentials. URL: <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Zr/Document>.
  3. BENEDICT, M., PIGFORD, T. H., AND LEVI, H. W.. (1981). Nuclear Chemical Engineer, Second Edition. McGraw-Hill Book Company, New York
  4. Setyawan, Aditya Nugraha. (2010). Ekstraksi dan Karakterisasi Pasir Zirkon ke Zirkonia Dengan Proses Alkali Fusion. URL <http://digilib.itb.ac.id/gdl.php?mod=browse&op=read&id=jbptitbpp-gdl-adityanugr-32094>.
  5. KRIS TRI BASUKI, (1993), “Kimia Aktinida dalam Teknologi Nuklir”, 1993, pp. 3 – 25, 39 – 50, Duta Wacana University Press., Yogyakarta.
  6. ADLER, S., BRYAN, P., ROBINSON, S., WATSON, J., (2000),”Vision 2020: 2000 Separations Roadmap”, AIChE, New York.
  7. LADDHA, G. S. AND DEGALLESAN, T. E., (1976),”Transport Phenomena in Liquid Extraction”, Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd., New Delhi No. 6.
  8. PRISTRI HARTATI, BUSRON MASDUKI, SUNARDJO, (1996). Ekstraksi Pemisahan Zr-Hf Dengan Pelarut Tributyl Phosfat – N.Heptan, PPI, PPNY – BATAN , Yogyakarta.
  9. TUNJUNG INDRATI Y., dkk., (1992), Ekstraksi Pemisahan Zr-Hf Hasil Pengolahan Pasir Zirkon Menggunakan Pesawat Pengaduk Pengenap, PPI, PPNY – BATAN , Yogyakarta.
  10. LEVENSPIEL, O., (1972), “Chemical Reaction Engineering”, 2ed., John Wiley & Sons, New York.
  11. Radityanovic. (2010), PK2. URL: <http://www.scribd.com/doc/36909343/pk2>
  12. Keusch, Peter. (2011). Kinetika Kimia Tingkat Hukum, Persamaan Arrhenius-Eksperimen. URL:
-

[http://translate.google.co.id/translate?hl=id&langpair=en|id&u=http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat\\_Fak\\_IV/Organische\\_Chemie/Didaktik/Keusch/kinetics.htm](http://translate.google.co.id/translate?hl=id&langpair=en|id&u=http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/Didaktik/Keusch/kinetics.htm)

13. -----, Cyanex 272 extractant, solvent extraction reagent.