

STUDI EKSPERIMEN HYBRID PROSES SIR (SOLVENT IMPREGNATED RESINS) UNTUK PEMISAHAN Zr – Hf

Dwi Biyantoro dan Suyanti

PTAPB – BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6601 ykbb, Yogyakarta 55010

dbiyantoro@gmail.com

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMEN HYBRID PROSES SIR (SOLVENT IMPREGNATED RESINS) UNTUK PEMISAHAN Zr – Hf. Telah dilakukan pembuatan model isotermis adsorpsi Langmuir dan Freundlich studi eksperimen hybrid proses solvent impregnated resins (SIR) pemisahan Zr dan Hf. Solvent impregnated resins menggunakan ekstrak bis (2-ethylhexil) fosfat (D₂EHPA) dan tri butil fosfat (TBP) dan resin XAD-7 sebagai polimer pendukung. Pengaruh parameter yang diteliti yaitu: perbandingan berat solven dengan resin (pembuatan SIR), perbandingan berat SIR dengan volume umpan (ZOC), dan waktu ekstraksi. Kondisi optimum yang diperoleh pada komposisi ekstrak (D₂EHPA/TBP = 3/1) dengan resin yaitu 60 : 40, perbandingan SIR dan volume umpan yaitu 45 g resin dan umpan 7 mL, dan waktu pengadukan selama 60 menit. Pada kondisi ini diperoleh efisiensi Zr = 35,84% dan efisiensi Hf = 5,36%. Dari kajian diperoleh bahwa adsorpsi lebih cenderung mengikuti model isotrmis adsorpsi Langmuir dari pada Freundlich. Model Langmuir menggunakan persamaan: $(C/m) = (1/b) K + (1/b) C$ diperoleh persamaan $Y = 0,029 X + 11,64$ dengan $r^2 = 0,994$, sedang untuk model Freudlich = $\ln Q = \ln K_F + (\ln C)/n$ diperoleh persamaan $Y = 5,386 X + 19,59$ dengan $r^2 = 0,945$.

Kata kunci: Solvent Impregnated Resins, Zr, dan Hf

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF HYBRID PROCESS MODELING SIR (SOLVENT IMPREGNATED RESINS) FOR SEPARATION Zr - Hf. Langmuir adsorption isotherm modeling and experimental studies of hybrid process solvent impregnated resins (SIR) the separation of Zr and Hf have done. Solvent extractant impregnated resins using bis (2 - ethylhexyl) phosphate (D₂EHPA) and tri- butyl phosphate (TBP) and XAD - 7 resin as a polymer support. The parameter swere studied are: weight ratio of solvent to resin (SIR - making), the weight ratio of SIR to volume of feedback (ZOC), and extraction time. The optimum condition was obtained on the composition of the extractant (D₂EHPA/TBP = 3:1) with a resin that is 60 : 40, ratio of SIR and volum is 45 g resin and 7 mL, and time stirring for 60 minutes. In these conditions obtained efficiency = 35.84 % Zr and efficiency of Hf = 5.36 %. From the study found that the adsorption is more likely to follow the model of the Langmuir adsorption isotrmis Freundlich. Langmuir model using the equation : $(C / m) = (1 / b) K + (1 / b) C$ obtained by the equation $Y = 0.029 X + 11.64$ with $r^2 = 0.994$, while for the model Freudlich = $\ln Q = \ln K_F + (\ln C) / n$ obtained by the equation $Y = 5.386 X + 19.59$ with $r^2 = 0.945$.

Kata kunci: Solvent Impregnated Resins, Zr, dan Hf

PENDAHULUAN

Zirkonium (Zr) merupakan salah satu mineral yang banyak dimanfaatkan baik dalam industri nuklir maupun non nuklir. Dalam teknologi nuklir zirkonium digunakan pada Reaktor Suhu Tinggi (RST) yaitu salah satu tipe reaktor yang telah dirancang untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Dalam industri zirkonium banyak sekali kegunaannya antara lain untuk: keramik, refraktori, sensor oksigen, tabung sinar katoda atau *cathode ray tube* (CRT)^(1,2).

Pada Reaktor Suhu Tinggi bahan bakar yang digunakan mempunyai inti bahan bakar partikel terlapis, yang berfungsi untuk mengungkung hasil-hasil reaksi fisi sehingga tidak keluar dari elemen bahan bakar. Bahan pelapis yang biasa digunakan terdiri dari PyC dan SiC atau ZrC. Zirkonium dipilih sebagai bahan pelapis dikarenakan zirkonium

memiliki beberapa keunggulan, yaitu memiliki penampang lintang serapan penampang neutron yang rendah (0,18 barn), sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap panas, dan resistensi terhadap korosi, sehingga memiliki potensi untuk menggantikan unsur silikon dalam SiC dari partikel pelapis kernel elemen bahan bakar Reaktor Suhu Tinggi (Setyadji, 2011)⁽³⁾.

Kendala utama yang dialami adalah keberadaan zirkonium alam selalu disertai unsur hafnium (Hf), yang memiliki kemiripan sifat kimia dengan zirkonium. Keberadaan hafnium dalam reaktor nuklir berpotensi menghambat berlangsungnya reaksi fisi. Hal ini disebabkan hafnium memiliki penampang lintang serapan neutron yang cukup tinggi yaitu 115 barn. Hafnium sendiri di dalam reaktor nuklir digunakan sebagai batang kendali, sehingga jelas zirkonium dan hafnium memiliki peran dan fungsi

yang berbeda di dalam reaktor nuklir. Oleh karena itu dewasa ini terus dikembangkan penelitian untuk memisahkan hafnium dari zirkonium untuk mendapatkan zirkonium dengan derajat kemurnian nuklir, yaitu kandungan pengotor hafnium maksimal hanya 100 ppm (US Patent, 1997).

Pemisahan unsur Zr-Hf biasanya dikerjakan dengan ekstraksi pelarut atau penukar ion. Namun, teknik ekstraksi pelarut dan penukar ion memiliki beberapa keterbatasan. Ekstraksi pelarut masih membutuhkan banyak tahap ekstraksi dan ekstraksi balik untuk mendapatkan pemisahan optimum. Selain itu, limbah cair yang dihasilkan dari ekstraksi pelarut dapat menimbulkan polusi lingkungan. Keterbatasan dari resin penukar ion, yaitu selektifitas pemisahan dan kapasitas sorpsinya rendah. Pada tahun 1971, Warshawsky⁽⁴⁾ memperkenalkan metode impregnasi secara fisik yang dikenal dengan metode solvent impregnated resins (SIR) untuk pemisahan ion-ion logam. Metode SIR telah digunakan untuk perolehan kembali ion-ion logam atau senyawa organik, pemekatan ion-ion logam dalam jumlah renik dan juga untuk menyingkirkan ion-ion logam berbahaya, seperti kadmium, air raksa dan krom(VI).⁽⁵⁾

Konsep dari SIR adalah memasukkan reagen ekstraksi ke dalam matriks polimer berpori, dapat dilakukan melalui teknik impregnasi, maupun memasukkan ekstrak tersebut saat proses sintesis material berpori. Solvent Impregnated Resins diaplikasikan dalam banyak proses pemisahan padatan-cairan, aplikasi analitis, dan proses *recovery*. Beberapa hal harus dipertimbangkan dalam proses impregnasi, dia antaranya harus memiliki sifat permukaan dan porositas yang cukup baik. Kelarutan ekstrak dalam air juga cukup rendah, untuk mencegah hilangnya ekstrak yang diimpregnasi selama proses ekstraksi. Ekstrak juga memiliki viskositas yang cukup, agar ekstrak dapat dengan mudah masuk ke dalam pori-pori matriks resin, dan proses impregnasi tidak merusak struktur kimia dan sifat fisika dari matriks polimer resin.^(5,6)

Resin Amberlite biasa digunakan untuk proses SIR. Resin Amberlite didesain dalam berbagai karakteristik pori, baik ukuran maupun volumenya. Resin Amberlite XAD-7, yang digunakan dalam penelitian ini, merupakan polimer ester akrilat makropori. Volume pori resin ini sekitar 35-50 mesh, memiliki diameter pori 90 Å, dan luas permukaannya mencapai 450 m²/gram. Resin ini telah diteliti dan diuji diimpregnasikan dengan berbagai ekstrak, memberikan hasil berupa efisiensi yang lebih baik, ekstraksi ion logam yang lebih cepat jika dibandingkan polimer stirena-divinil benzena makropori hidrofobik lainnya, misalnya Amberlite XAD-2.

Usaha-usaha untuk memisahkan antara Zr dan Hf terus dilakukan dan semakin berkembang yang mengarah pada upaya-upaya pencaarian metode-metode baru yang murah, efektif dan efisien. Metode

SIR merupakan metode adsorpsi yaitu terjadinya penambahan konsentrasi komponen tertentu pada permukaan antara dua fase. Isoterm adsorpsi merupakan hal yang mendasar dalam penentuan kapasitas adsorpsi suatu adsorbat pada permukaan adsorben.⁽⁷⁾

Penelitian ini bertujuan untuk studi eksperimen hybrid proses *solvent impregnated resins* (SIR) pemisahan Zr dan Hf dari medium nitrat menggunakan asam di-(2-etilheksil) fosfat (D2EHPA) dan tributylfosfat (TBP) sebagai ekstraktannya dan Amberlite XAD7 sebagai polimer pendukung. Senyawa D2EHPA adalah ekstrak ion logam yang banyak digunakan dalam ekstraksi pelarut untuk pemisahan berbagai ion logam. Namun, belum banyak dilakukan penelitian yang berkenaan dengan pemisahan Zr-Hf menggunakan metode solvent impregnated resin. Optimasi penyerapan ion Zr/Hf oleh SIR dari umpan larutan zirkonil nitrat dihitung sebagai persen (%) penyerapan dengan formula:

$$E = \{(Co - Ce) / Co\} \times 100\% \quad (1)$$

dengan:

Co = konsentrasi awal larutan

Ce = konsentrasi setelah proses adsorpsi

TATA KERJA

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian: larutan umpan $ZrOCl_2 \cdot xH_2O$ (campuran Zr-Hf) atau ZOC, Resin Amberlite XAD-7, serbuk $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ standar, larutan H_2SO_4 96%, larutan HNO_3 2 M, larutan NaOH 2 M, larutan asam bis(2-etilheksil) fosfat (D2EHPA), larutan tributyl fosfat (TBP), aseton, indikator pH universal, kertas saring, dan aquades.

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian: alat-alat gelas laboratorium, beker gelas, pipet, corong pisah, magnetik stirrer with hot plate, spektrometer pendar sinar-X (XRF), Analisa Aktivasi Netron (AAN), timbangan analitik, pengaduk magnet, dan botol-botol sampel.

Cara kerja

1. Pembuatan kurva larutan standar zirkonium

Larutan standar zirkonium 100.000 ppm dibuat dengan melarutkan sebanyak 17,86 gram serbuk $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ hingga volume 50 mL. Dari larutan induk tersebut dibuat masing-masing 25 mL larutan standar zirkonium 10.000; 20.000; 30.000; 40.000; dan 50.000 ppm. Masing-masing larutan standar tersebut dianalisis dengan XRF untuk mengetahui nilai cacah Zr dan Compton.

2. Penyiapan larutan campuran solven D₂EHPA-TBP (3:1)

Sebanyak 19,86 mL larutan D₂EHPA dicampurkan dengan 10,28 mL larutan TBP. Larutan kemudian diaduk sampai homogen.

3. Penyiapan impregnasi resin / aktivasi resin Amberlite XAD-7

Sebanyak 40 gram resin Amberlite XAD-7 direndam dalam larutan HNO₃ 2 M selama 2 jam, kemudian disaring. Selanjutnya resin direndam lagi ke dalam larutan NaOH 2 M selama 2 jam, kemudian disaring. Resin yang masih basah dibilas dengan akuades hingga netral. Setelah netral, resin direndam dalam aseton selama 2 jam. Resin kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 50 °C.

4. Impregnasi resin

Sebanyak 7,5 gram resin aktif dicampurkan ke dalam 25 mL aseton dan 5 gram campuran solven D₂EHPA-TBP (ekstraktan). Campuran kemudian diaduk dengan pengaduk magnet selama 2 jam. Resin yang telah terimpregnasi solven (SIR) ini kemudian dikeringkan dalam oven vakum pada temperatur 50 °C selama 24 jam.

5. Percobaan adsorpsi dalam SIR

Umpan ZOC dilarutkan dalam asam nitrat. Masing-masing 7 mL larutan dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 25 g SIR dicampur dan diaduk selama 30 menit pada kecepatan 150 rpm. Campuran kemudian dibiarkan selama 10 menit. Setelah itu dipisahkan antara padatan dan filtratnya. Untuk mengetahui efisiensi penyerapan Zr dan Hf dilakukan analisis filtrat. Analisis menggunakan alat pendar sinar - X dan AAN.

Parameter yang dipelajari yaitu: variasi perbandingan berat solven dengan resin (40 : 60; 50 : 50, dan 60 : 40), perbandingan berat SIR dengan volume umpan (mulai berat: 15 g, 25, 35, 45, dan 55 g masing-masing terhadap volume umpan 7 mL) dan pengaruh waktu pengadukan (15 menit, 30, 45, 60, dan 75 menit) terhadap efisiensi Zr dan Hf.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi perbandingan berat solven dengan resin

Adsorpsi umpan Zr-Hf ke dalam SIR. SIR merupakan campuran resin XAD-7 dengan solvent TBP dan D₂EHPA. Waktu kontak = 30 menit, komposisi ekstraktan = D₂EHPA/TBP = 3/1.

Tabel 1. Pengaruh perbandingan berat solven dengan resin. Umpan : kadar Zr = 33348 ppm dan Hf = 561 ppm. Berat SIR = 25 g dalam volume umpan 7 mL

No.	Berat solven : resin	Efisiensi Zr, %	Efisiensi Hf, %
1	40 : 60	13,37	0,50
2	50 : 50	12,31	12,33
3	60 : 40	7,77	25,32

Dari hasil percobaan adsorpsi Zr dan Hf ke dalam SIR dalam Tabel 1 ditunjukkan bahwa pada perbandingan berat solven dengan berat SIR = 40 : 60 dapat menghasilkan pemisahan antara Zr dan Hf yang optimum. Pada kondisi ini Zr terikat sebanyak 13,37% sedangkan Hf yang terikat dalam SIR sebanyak 0,50%. Hal ini menunjukkan bahwa Zr murni dapat terjerap dalam SIR.

Variasi berat SIR yang ditambahkan dalam umpan

Adsorpsi umpan Zr-Hf ke dalam SIR. SIR merupakan campuran resin XAD-7 dengan solvent TBP dan D₂EHPA. Waktu kontak = 30 menit, komposisi ekstraktan = D₂EHPA/TBP = 3/1, dan perbandingan berat solven dan berat resin = 40/60.

Tabel 2. Pengaruh perbandingan berat SIR dengan resin. Volume umpan 7 mL

No.	Berat SIR (g)	Efisiensi Zr, %	Efisiensi Hf, %
1	15	14,16	0,67
2	25	28,69	5,02
3	35	25,79	11,58
4	45	35,84	5,36
5	55	39,93

Dari hasil percobaan adsorpsi Zr dan Hf ke dalam SIR dalam Tabel 2 ditunjukkan bahwa banyaknya SIR yang dapat menyerap Zr dan Hf dalam larutan umpan mempengaruhi efisiensi penyerapan Zr maupun Hf. Kondisi optimum pemisahan antara Zr dan Hf diperoleh pada pemakaian berat SIR = 45 g karena dapat meningkatkan penyerapan Zr dan sedikit Hf yang ada dalam SIR. Pada kondisi ini Zr terikat sebanyak 35,84% dengan pengotor Hf = 5,36%.

Variasi waktu adsorpsi terhadap efisiensi Zr dan Hf

Adsorpsi umpan Zr-Hf ke dalam SIR. SIR merupakan campuran resin XAD-7 dengan solvent TBP dan D₂EHPA. Komposisi ekstraktan = D₂EHPA/TBP = 3/1, perbandingan berat solven dan berat resin = 40/60, dan banyaknya SIR = 45 g.

Tabel 3. Pengaruh waktu adsorpsi terhadap efisiensi Zr dan Hf. Volume umpan 7 mL

No.	Waktu (menit)	Efisiensi Zr, %	Efisiensi Hf, %
1	15	14,16	5,32
2	30	28,69	5,02
3	45	28,79	11,58
4	60	35,84	5,36
5	75	29,13	7,21

Dari hasil percobaan adsorpsi Zr dan Hf ke dalam SIR dalam Tabel 3 ditunjukkan bahwa waktu pengadukan mempengaruhi hasil penyerapan Zr dan Hf dari larutan umpan. mempengaruhi efisiensi penyerapan Zr maupun Hf ke dalam SIR. Kondisi

optimum pengadukan selama 60 menit karena dapat meningkatkan penyerapan Zr dan sedikit Hf yang ada dalam SIR. Pada kondisi ini Zr terikat sebanyak 35,84% dengan pengotor Hf = 5,36%.

Dari hasil Tabel 1, 2, dan 3 ditunjukkan bahwa pemisahan yang optimum diperoleh yaitu pada perbandingan berat solven dengan berat resin = 40 : 60, banyaknya berat SIR = 45 g, dan waktu adsorpsi 60 menit menggunakan umpan Zr = 33348 ppm dan Hf = 561 ppm. Pada kondisi ini diperoleh efisiensi penyerapan Zr = 35,84% dan efisiensi penyerapan Hf = 5,36.

Pembuatan model isotermis adsorpsi Langmuir dan Freundlich studi eksperiment hybrid proses solvent impregnated resins (SIR) pemisahan Zr dan Hf. Solvent impregnated resins menggunakan ekstrak bis (2-etilheksil) fosfat (D₂EHPA) dan tri butil fosfat (TBP) dan resin XAD-7 sebagai polimer pendukung.

Kajian termodinamika adsorpsi dalam sistem SIR dilakukan dengan menghitung nilai kapasitas adsorpsi, konstanta kesetimbangan dan energi adsorpsi masing-masing logam berdasarkan persamaan isoterm adsorpsi Langmuir (1916) dan Freundlich (1906).

Model isoterm adsorpsi Langmuir mengasumsikan bahwa permukaan adsorben mempunyai sejumlah tertentu situs adsorpsi yang sebanding dengan luas permukaan adsorben dan adsorpsi hanya terjadi pada *monolayer* saja. Adsorpsi tidak dimungkinkan terjadi pada adsorben yang telah terisi oleh spesies adsorbat, namun terjadi pada bagian yang kosong. Apabila situs aktif adsorpsi sudah jenuh dengan spesies adsorbat maka kenaikan konsentrasi adsorbat relatif tidak meningkatkan jumlah logam yang teradsorpsi atau bahkan adsorpsinya cenderung turun (Oscik, 1982). Model isoterm adsorpsi Langmuir dinyatakan dengan Persamaan (2).^(8,9,10)

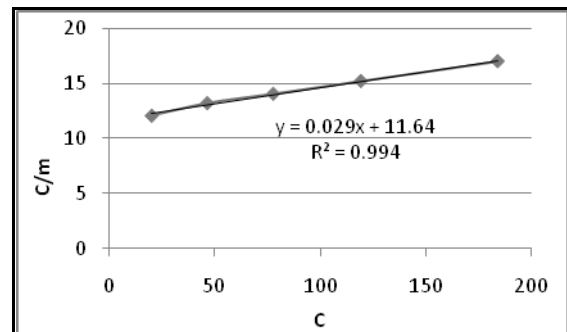
$$C/m = 1/bK + (1/b)C \quad (2)$$

di mana C adalah konsentrasi kesetimbangan, m adalah jumlah zat yang teradsorpsi per gram adsorben, b adalah kapasitas adsorpsi dan K adalah tetapan kesetimbangan adsorpsi. Dari kurva linear hubungan antara C/m versus C maka dapat ditentukan nilai b dari kemiringan (*slope*) dan K dari intersep kurva.

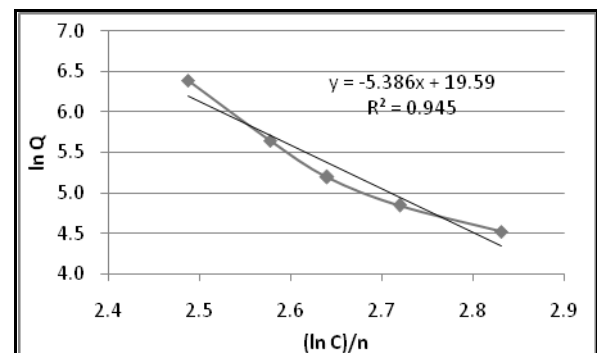
Model isoterm adsorpsi Freundlich (1906), digunakan untuk menjelaskan proses adsorpsi non ideal pada permukaan yang heterogen. Heterogenitas dapat disebabkan oleh adanya perbedaan gugus fungsional pada permukaan adsorben. Secara empiris persamaan isoterm Freundlich dinyatakan dengan persamaan (3).

$$\ln Q = \ln K_F + (\ln C_e)/n \quad (3)$$

dengan Q adalah jumlah ion logam teradsorpsi (mmol/g), C_e adalah konsentrasi Zr pada saat kesetimbangan (mmol/ml), n adalah konstanta Freundlich, dan K_F adalah konstanta menunjukkan afinitas atau kapasitas adsorpsi adsorben terhadap adsorbat.



Gambar 1. Hubungan antara C/m versus C menurut persamaan Langmuir



Gambar 2. Hubungan antara $1/Q$ versus $1/C$ menurut persamaan Freundlich

Berdasarkan kajian adsorpsi SIR diperoleh nilai konstanta Langmuir dan Freundlich, dan kapasitas adsorpsi disajikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2. Dilihat dari nilai koefisien regresi linear dalam tabel itu terlihat bahwa adsorpsi Zr dalam semua sistem SIR cenderung lebih mengikuti model isotermis adsorpsi Langmuir dari pada Freundlich. Model Langmuir ditunjukkan pada persamaan (2) menggunakan persamaan: $(C/m) = (1/b) K + (1/b) C$ diperoleh persamaan $Y = 0,029 X + 11,64$ dengan $r^2 = 0,994$, sedang untuk model Freundlich ditunjukkan pada persamaan (3): $\ln Q = \ln K_F + (\ln C)/n$ diperoleh persamaan $Y = 5,386 X + 19,59$ dengan $r^2 = 0,945$.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pemodelan studi eksperimen hybrid proses SIR (solvent impregnated resins) pemisahan Zr-Hf diperoleh kondisi optimum: menggunakan berat solven : resin = 40 : 60, menggunakan berat SIR = 45 gram, dan waktu adsorpsi = 60 menit. Pada kondisi ini Zr terikat sebanyak 35,84% dengan pengotor Hf = 5,36%. Dari

kajian diperoleh bahwa adsorpsi lebih cenderung mengikuti model isotrmis adsorpsi Langmuir dari pada Freundlich. Model Langmuir menggunakan persamaan: $(C/m) = (1/b) K + (1/b) C$ diperoleh persamaan $Y = 0,029 X + 11,64$ dengan $r^2 = 0,994$, sedang untuk model Freudlich = $\ln Q = \ln K_F + (\ln C)/n$ diperoleh persamaan $Y = 5,386 X + 19,59$ dengan $r^2 = 0,945$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Purwoto, R. Sudibyo dan Sdri. Suprihati yang telah banyak membantu dalam melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Biyantoro, D. dan Purwani, Optimasi Pemisahan Zr – Hf Dengan Cara Ekstraksi Memakai Solven TOPO, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Vol. 9 No. 1 PTBBN – BATAN, (2013).
2. Dwi Biyantoro dan Muhadi, Kajian Pemisahan Zr – Hf dengan Proses Ekstraksi, PPI Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PTAPB – BATAN, Yogyakarta (2010).
3. Zhou, X., Tang., T., Curent Status and Future Development of Coated Fuel Particle for High Temperature Gas-Cooled Reactor, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, (2010).
4. Cortina, J. L. and Warsawsky, A., Development in Solid Liquid-Liquid Extraction by Solvent Impregnated Resin, in J.A, J.A., Marinsky Y., Marcus, (Eds.) Marcel Dekker, (1997).
5. Kabay, N., Cortina, J. L., Trochimczuk, A., and Streat, M., Solvent Impregnated Resins (SIRs)- Methode of preparation and their applications, Reactive and Functional Polymers, Volume 70, Issued 8, Elsevier, Turkey, (2010).
6. Khaldun, I., Buchari, Amran, M. B., Sulaeman, Separation of Sm(III) and Gd(III) using solvent-impregnated resin containing di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D₂EHPA) and tributyl phosphate (TBP), Proceeding of The International Seminar on Chemistry, Jatininggor, (2008).
7. Lelyfajri, Adsorpsi Ion Logam Cu(III) Menggunakan Ligan dari Limbah Serbuk Kayu Gergaji, Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan, Vol. 7, No. 3, hal 126-129, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, (2010).
8. Nooryono, dkk., Termodinamika Adsorpsi Multi Logam Au-Cu, Au-Ni, dan Au-Cu-Ni Pada Hibrida Merkupto-Silika, Seminar Himpunan Nasional Kimia Indonesia (SNHKI), Makasar, (2010),
9. Oscik, J., Adsorption, John Wiley & Sons Chi Chester, 1982.
10. Kundari, N., A., dan Wiyuniati, S., Tinjauan Kesetimbangan Adsorpsi Tembaga Dalam Limbah Pencuci PCB Dengan Zeolit, Seminar Nasional IV, SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta, (2008).