



OPTIMASI PENYERAPAN MOLIBDENUM-99 PADA MATERIAL BERBASIS ZIRKONIUM (MBZ)

Indra Saptiama¹, Herlina¹, Endang Sarmini¹, Sriyono¹, Hotman Lubis¹, Herlan Setiawan¹,
Marlina¹, Abdul Motalib²

¹Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka - BATAN Serpong

²Universitas Pajajaran

Key words :

Molibdenum-99,
Zirkonium,
Penyerap,
FTIR,
BET

Abstrak

OPTIMASI PENYERAPAN MOLIBDENUM-99 PADA MATERIAL BERBASIS ZIRKONIUM (MBZ). Zirkonium merupakan unsur yang memiliki karakteristik yang khas dan sering digunakan dalam komponen material nuklir karena memiliki ketahanan terhadap korosi, keasaman serta memiliki tampang lintang absorpsi terhadap neutron termal yang rendah. Pada penelitian ini material berbasis zirkonium (MBZ) disintesis untuk penyerap molibdenum-99 (⁹⁹Mo) pada generator radioisotop ⁹⁹Mo/^{99m}Tc. MBZ disintesis melalui reaksi termal kondensasi antara ZrCl₄ dan isopropil alkohol. Variasi lama pemanasan pada temperatur 150 °C (waktu pemanasan selama 30 menit, MBZ-30; 60 menit, MBZ-60; 120 menit, MBZ-120 dan 240 menit, MBZ-240) setelah pelapisan MBZ dengan tetra etil orto silikat (TEOS) dilakukan untuk mendapatkan MBZ yang memiliki daya serap molibdenum-99 yang tinggi. Hasil uji MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120 dan MBZ-240 secara visual memperlihatkan bahwa penyerap ini memiliki warna yang kecoklatan dan tidak rapuh. Hasil uji luas permukaan spesifik penyerap MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120 dan MBZ-240 dengan menggunakan Brunauer, Emmett and Teller (BET) berturut-turut adalah 22,45, 21,47, 19,5, 16,08 mm²/g. Hasil BET ini memperlihatkan semakin lama waktu pemanasan maka semakin menurun luas permukaan spesifik penyerap MBZ. Karakterisasi penyerap MBZ-60 dengan fourier transform infra red (FTIR) menunjukkan terdapat ikatan Si-O-Si di 1080 – 1099 cm⁻¹ pada MBZ setelah dilapis TEOS. Pada MBZ-60 setelah penyerapan Mo sementara itu terlihat adanya serapan pada 950cm⁻¹ yang mengindikasikan adanya ikatan Mo-O. Hasil uji serap penyerap MBZ terhadap molibdenum-99 menunjukkan bahwa MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120 dan MBZ-240 memiliki yield penyerapan sebesar 47,1 ; 86,3; 82,1 dan 52,4 % dan kapasitas serap sebesar 107,2 ; 196,3; 186,7 dan 119,2 mg/g MBZ. Berdasarkan hasil uji ini dapat dilihat bahwa MBZ-60 dan MBZ-120 merupakan penyerap MBZ yang memiliki kapasitas serap molibdenum-99 yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan MBZ lainnya dan dinilai cocok sebagai penyerap untuk generator ⁹⁹Mo/^{99m}Tc

OPTIMIZATION ADSORPTION OF ⁹⁹Mo IN ZIRCONIUM-BASED MATERIAL (ZBM) . Zirconium is an element that has unique characteristics and is often used as a component of nuclear material because it has corrosion resistance, acidity and the absorption of cross-section has a low thermal neutron. In this study, zirconium-based materials (MBZ) were synthesized for adsorbent of molybdenum-99 on ⁹⁹Mo/^{99m}Tc radioisotope generator. MBZ was synthesized by thermal condensation between ZrCl₄ and isopropyl alcohol. Variation of drying time at 150 °C (30 minutes for MBZ-30; 60 minutes, MBZ-60; 120 minutes, MBZ-120; and 240 minutes, MBZ-240) after MBZ coated with tetra ethyl ortho silicate (TEOS) was conducted in order to obtain MBZ with high adsorption capacity towards Mo. The visual test results showed that MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, and MBZ-240 adsorbents had brownish color and were not fragile. The specific surface area test results of MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, and MBZ-240 adsorbent by using Brunauer, Emmett and Teller (BET) were 22,45, 21,47, 19,5, 16,08 mm²/g, respectively. Based on the BET results, it can be seen that longer drying time resulted in lower the specific surface area of MBZ. The characterization of MBZ-60 adsorbent using fourier transform infra red (FTIR) showed that there was Si-O-Si bond at 1080-1099 cm⁻¹ in MBZ after coated by TEOS. Meanwhile, MBZ-60 which had adsorbed Mo showed IR band at 950 cm⁻¹ that indicated the existence of Mo-O bond. The Mo-99 adsorption test results

Penulis Korespondensi

e-mail: indra.saptiama@batan.go.id

showed that the adsorption yield of MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120 and MBZ-240 were 47,1 ;86,3; 82,1 and 52,4 % respectively with adsorption capacity of 107,2 ; 196,3; 186,7 dan 119,2 mg/g MBZ respectively. Based on the above-mentioned results, MBZ-60 and MBZ-120 were MBZ adsorbent were found to have higher adsorption capacity than the others and more suitable as adsorbent for molybdenum-99 on $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator.

PENDAHULUAN

Zirkonium (Zr) memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dari alkali, keasamaan, air garam dan lain-lain [1]. Zirkonium juga memiliki kombinasi sifat-sifat unik dimana sejak lama digunakan dalam struktur material dari reaktor nuklir fisi. Zirkonium dipilih sebagai salah satu komponen material reaktor karena memiliki kekuatan mekanik dan karakteristik proses seperti material pada umumnya tetapi memiliki tampang lintang absorpsi terhadap neutron termal yang rendah [2]. Oleh karena itu, material berbasis zirkonium banyak digunakan dalam teknologi yang berkaitan dengan reaksi nuklir. Salah satunya adalah sebagai bahan dasar material penyerap radioisotop. Material berbasis zirkonium ini digunakan sebagai bahan penyerap radioisotop seperti molibdenum-99 (Mo-99) dan tungsten-188 (W-188) berurut-turut pada generator radioisotop $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ penghasil radioisotop teknesium-99m dan generator radioisotop $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$ penghasil radioisotop rhenium-188 yang digunakan di bidang kedokteran nuklir [3,4,5,6].

Pada saat ini, material berbasis zirkonium telah mulai menggeser penggunaan alumina sebagai material penyerap pada generator radioisotop $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Hal ini disebabkan oleh produksi molibdenum dari hasil fisi saat ini sudah mulai dibatasi seiring dengan adanya pembatasan penggunaan target uranium diperkaya sehingga beralih menggunakan target molibdenum alam. Penggunaan target molibdenum alam (1Ci/1,5

g Mo), pada gilirannya akan memerlukan material penyerap yang memiliki kapasitas serap Mo yang tinggi. Alumina hanya memiliki kapasitas penyerapan molibdenum sebesar 2-20 mg Mo yang sesuai sebagai material penyerap Mo-99 (1-100 Ci/0,01 mg Mo) yang dihasilkan dari reaksi fisi uranium sedangkan Masakazu Tanase dkk, dilaporkan telah berhasil mengembangkan material penyerap berbasis zirkonium yang memiliki kapasitas serap terhadap Mo mencapai 200 mg Mo/g material penyerap. Material berbasis zirkonium ini sangat potensial untuk dikembangkan sebagai bahan penyerap ^{99}Mo [3,7,8].

Penyerap Mo-99 nantinya akan digunakan untuk memperoleh radioisotop teknesium-99m (Tc-99m). Secara alami, Mo-99 akan meluruh menjadi Tc-99m. Tc-99m memiliki waktu paruh pendek ($T_{1/2} = 6$ jam) dan memancarkan energi gamma dengan energi 140,5 KeV. Tc-99m merupakan radioisotop diagnosis yang digunakan untuk berbagai aplikasi dari *single photon emission computed tomography* (SPECT) [11,12].

Pada saat ini, Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka juga sedang mengembangkan penyerap MBZ untuk penyerap Mo alam yang telah diiradiasi yang merupakan bahan dasar generator radioisotop $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Salah satu parameter penting sebagai penyerap Mo, MBZ yang dikembangkan harus memiliki kapasitas serap Mo yang tinggi. Oleh karena itu, Optimasi

penyerapan Mo oleh MBZ sangat diperlukan untuk meningkatkan daya serap Mo-99.

Pada penelitian ini optimasi penyerapan Mo oleh penyerap MBZ dilakukan adalah dengan memvariasi lama waktu pemanasan setelah pelapisan TEOS. MBZ yang dihasilkan kemudian diuji daya serapnya terhadap Mo dan kemudian dibandingkan dengan daya serap PZC buatan Jepang (PZC-Chiyoda) yang dilaporkan teruji memiliki daya serap yang tinggi terhadap Mo [3].

TATA KERJA

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah (MBZ) adalah $ZrCl_4$, *tetrahydrofurane* (THF) dan metanol yang dipasok dari E.Merck. Bahan pendukung lainnya yakni *tetraethylorthosilicate* (TEOS) dari Aldrich dan aquabidest didapat dari IPHA-Indonesia. Mo-99 didapat dari hasil iradiasi di reaktor serba guna G.A Siwabessy dengan menggunakan bahan sasaran MoO_3 alam dari E-merck.

Peralatan yang digunakan adalah tungku pemanas (VULCAN A-130), *stirring hot plate* (Health Magnetic Surrer), dan timbangan analitik (Acculab ALC – 110.4). Pengukuran radioaktivitas Mo-99 menggunakan *dose calibrator* (Atomlab 100 Plus). Peralatan gelas yang digunakan dalam penelitian ini seluruhnya dari *pyrex*. Pengukuran luas permukaan spesifik dilakukan dengan metode *Brunauer, Emmett and Teller* (BET). Analisis sampel menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) (Bruker)

Sintesis penyerap Material Berbasis Zirkonium (MBZ)

MBZ disintesis melalui reaksi termal kondensasi antara $ZrCl_4$ dan isopropil alkohol seperti terlihat pada Persamaan 1.



Sejumlah serbuk $ZrCl_4$ (0,5 mol) ditambahkan ke dalam campuran larutan tetrahydrofuran (0,56 mmol) dan isopropanol (0,8 mmol) sambil diaduk dengan menggunakan *stirring hot plate* hingga $ZrCl_4$ larut. Campuran THF (0,25 mmol) dan aquabidest (0,4 mmol) secara perlahan kemudian ditambahkan ke dalam larutan diatas yang diikuti dengan pemanasan hingga temperatur 95 °C. Temperatur dijaga konstan hingga larutan mengental yang dilanjutkan dengan pengdukan selama 1-2 jam hingga larutan mulai membentuk adonan yang liat dan kering. Adonan tersebut dibiarkan selama semalam yang diikuti dengan pemanasan dalam furnace selama 1 jam pada temperatur 150 °C. Setelah pemanasan, adonan digerus dan dipisahkan dengan pengayakan *mesh* dengan ukuran 200-300 μm dan lebih kecil dari 200 μm . Partikel MBZ dengan ukuran 200-300 μm yang akan digunakan untuk material penyerap. Untuk memperkeras partikel, material dilapisi dengan TEOS yang dilakukan dengan mengalirkan larutan TEOS ke dalam kolom gelas berisi material MBZ.

Variasi waktu pemanasan MBZ setelah pelapisan TEOS

Penyerap MBZ yang telah dilapisi TEOS dipanaskan dalam *furnace* pada temperatur 150 °C selama 30 menit (MBZ-30); 60 menit (MBZ-60); 120 menit (MBZ-120); dan 240 menit (MBZ-240).

Uji Penyerapan Mo-99 pada MBZ

Sejumlah serbuk MBZ (1 g) yang telah dilapisi TEOS (MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, MBZ-240) diambil dan masing-masingnya dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 5 mL larutan Mo-99 aktif (mengandung 200 mg Mo, radioaktivitas 4 mCi). Campuran kemudian dipanaskan dalam *oil bath* pada temperatur 90 °C selama 3 jam yang dilanjutkan dengan proses dekantasi.

Penyerap MBZ selanjutnya dicuci dengan aquabidest hingga air cucian jernih. Selanjutnya MBZ diukur radioaktifitas Mo-99 dengan *dose calibrator*. Jumlah Mo-99 yang terserap pada penyerap MBZ dan kapasitas serap MBZ terhadap Mo kemudian dihitung.

Analisis luas permukaan spesifik penyerap MBZ

Analisis luas permukaan spesifik MBZ (MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, MBZ-240) dilakukan dengan cara mengamati isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen setiap contoh. Luas permukaan material dihitung dengan persamaan BET.

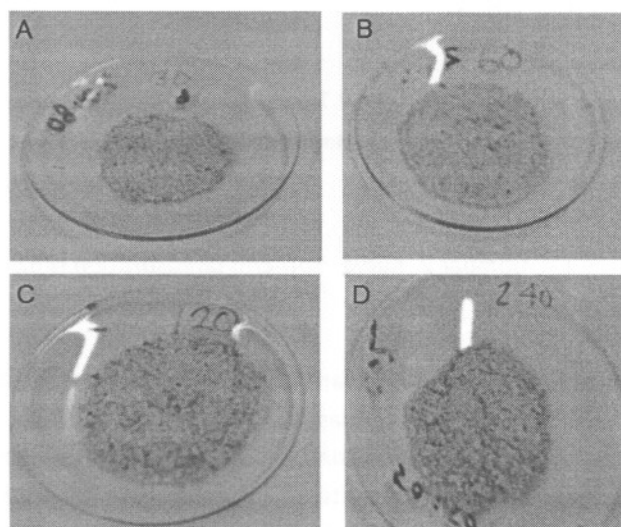
Karakterisasi MBZ menggunakan FTIR

Perubahan ikatan kimia yang terjadi pada penyerap MBZ sebelum dan setelah

pelapisan dengan SiO_2 , setelah penyerap MBZ (MBZ-30, BZ-60, MBZ-120, MBZ-240) menyerap Mo dikarakterisasi dengan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) Bruker.

HASIL DAN PEMBAHASAN.

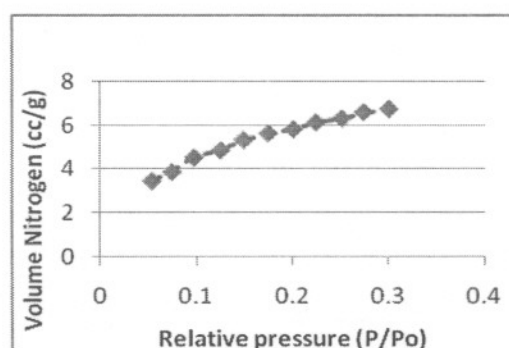
Empat jenis penyerap MBZ (MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, MBZ-240) yang telah berhasil disintesis dapat dilihat pada Gambar 1. Secara visual, ke empat jenis MBZ memiliki warna yang hampir sama yakni berwarna kecoklatan. Hasil analisis luas permukaan spesifik MBZ (MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, MBZ-240) dan PZC (Chiyoda, Jepang) sebagai pembanding dapat dilihat pada Tabel 1. ini dapat menentukan perbedaan luas permukaan spesifik.



Gambar 1. (a) MBZ-30, (b) MBZ-60, (c) MBZ-120, (d) MBZ-240

Tabel 1. Luas permukaan spesifik MBZ dan PZC

Material	Waktu (menit)	Luas permukaan spesifik (mm^2/g)
MBZ-30	30	22,45
MBZ-60	60	21,47
MBZ-120	120	19,5
MBZ-240	240	16,08
PZC	-	350,8



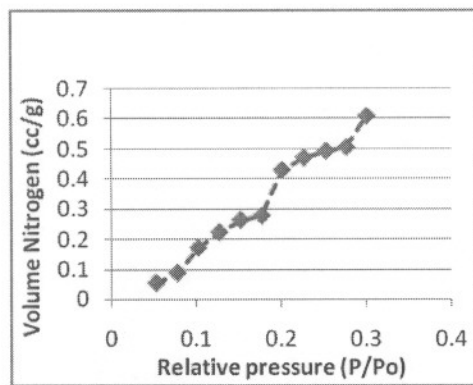
Gambar 2. Kurva *isotherm physisorption* MBZ

Berdasarkan analisis luas permukaan yang ditunjukkan pada Tabel 1. terlihat luas permukaan spesifik dari MBZ semakin menurun seiring dengan meningkatnya waktu pemanasan. Luas permukaan spesifik sebesar $22,4 \text{ mm}^2/\text{g}$ yang diperoleh dari waktu pemanasan 30 menit (MBZ-30) menurun hingga $16,08 \text{ mm}^2/\text{g}$ dengan waktu pemanasan 240 menit (MBZ-240). Luas

permukaan spesifik (MBZ) yang disintesis dalam penelitian ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan luas permukaan spesifik penyerap PZC (Chiyoda Jepang) ($350,8 \text{ mm}^2/\text{g}$). Secara teoritis, semakin besar luas permukaan suatu penyerap maka semakin besar sisi aktif penyerap yang pada gilirannya untuk meningkatkan kapasitas serap.

Gambar 2. menunjukkan kurva *isotherm physisorption* dari material penyerap MBZ yang telah disintesis. Menurut IUPAC [9], penyerap MBZ diklasifikasikan sebagai penyerap tipe I yang merupakan tipe material *microporous*. Penyerap tipe I memiliki *external surface* yang relatif kecil dan hanya memiliki *monolayer adsorption* [9]. Sementara itu PZC (Chiyoda Jepang) termasuk penyerap tipe IV yaitu material memiliki *multi adsorption layer surface* [9]. Kurva *isotherm physisorption* PZC (Chiyoda, Jepang) yang ditunjukkan pada Gambar 3. memperlihatkan sedikitnya memiliki dua *adsorbed layers*.

Hasil uji penyerapan Mo pada penyerap MBZ ((MBZ-30, MBZ-60, MBZ-120, MBZ-240) ditunjukkan pada Tabel 2. Jumlah Mo/Mo-99 yang terserap ke dalam penyerap MBZ-30 adalah sebesar 47,1% dari Mo-99 yang ada dalam larutan awal. Konversi persentasi penyerapan diatas menjadi kapasitas serap yang dihitung berdasarkan jumlah Mo yang diserap oleh sejumlah massa tertentu penyerap MBZ-30 akan memberikan kapasitas serap sebesar 107,2 g/g MBZ. MBZ-60, MBZ-120 dan MBZ-240 sementara itu berurut-turut memberikan persentase penyerapan sebesar 86,3 %; 82,1%; 52,4% dengan kapasitas serap terhadap Mo berurut-turut sebesar 196,3 ; 186,7; 119,2 g /g MBZ.



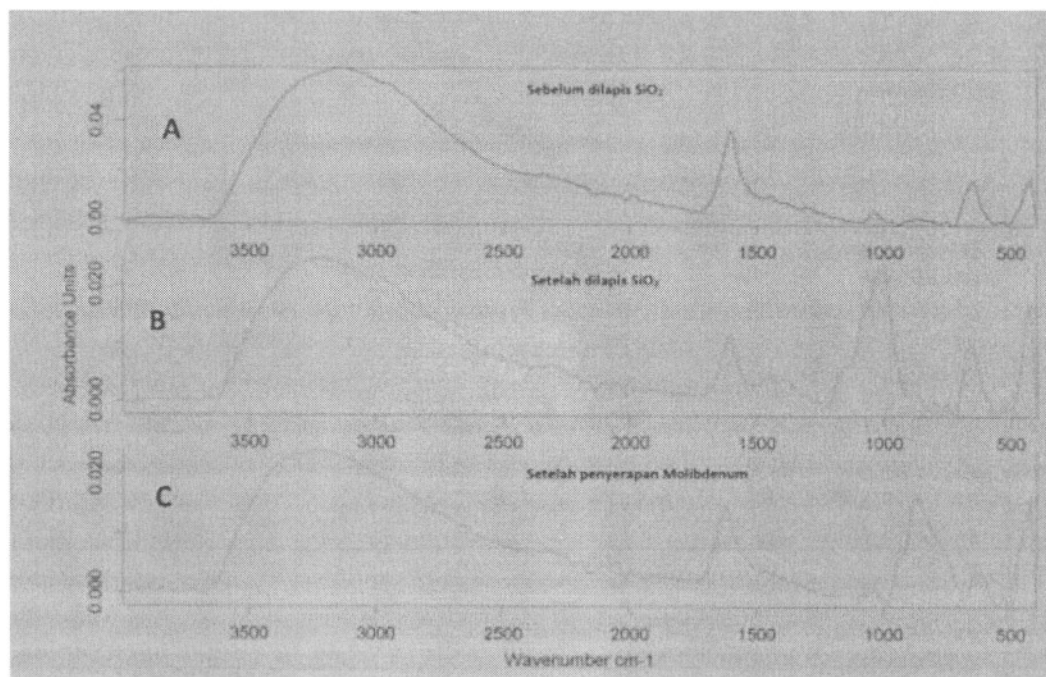
Gambar 3. Kurva *isotherm physisorption* PZC

Tabel 2. Hasil penyerapan Mo

Parameter	MBZ-30	MBZ-60	MBZ-120	MBZ-240
Kapasitas serap (mg/g MBZ)	107,2	196,3	186,7	119,2
Yield penyerapan (%)	47,1	86,3	82,1	52,4

Tabel 2. juga memperlihatkan penyerap dengan lama pemanasan 60 dan 120 menit (MBZ-60 dan MBZ-120) memiliki yield penyerapan dan kapasitas serap yang relatif tinggi dibandingkan penyerap MBZ yang lain. Hal ini sesuai dengan hasil uji luas permukaan spesifik MBZ-60 dan MBZ-120 yang relatif lebih besar dibanding dengan material penyerap MBZ lainnya (Tabel 1). Sebagai pembanding, penyerap PZC (Chiyoda, Jepang) memiliki kapasitas serap terhadap Mo sebesar 219 mg/g MBZ dengan luas permukaan 350.8 mm²/g. Uji penyerapan ini menunjukkan parameter pemanasan MBZ setelah pelapisan dengan TEOS merupakan parameter kritis pada proses sintesis MBZ. Penyerap MBZ-30 tidak seperti MBZ-60

dan MBZ-120, memberikan yield penyerapan dan kapasitas serap terhadap Mo berurut-turut hanya 47.1% dan 107.2 mg/ g MBZ. Yield penyerapan dan kapasitas serap MBZ-30 ini merupakan anomali dibandingkan dengan MBZ-60 dan MBZ-120 yang memiliki luas permukaan yang hampir sama dengan MBZ-60. Anomali ini diduga karena adanya molekul hidrat air yang masih terdapat pada material MBZ-30 sehingga penyerapan Mo-99 kurang optimal. Karakteristik *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) penyerap MBZ dilakukan untuk mengidentifikasi/ mendapatkan informasi struktur molekul penyerap MBZ sebelum dan sesudah dilapis dengan TEOS dan MBZ-60 setelah penyerapan Mo.



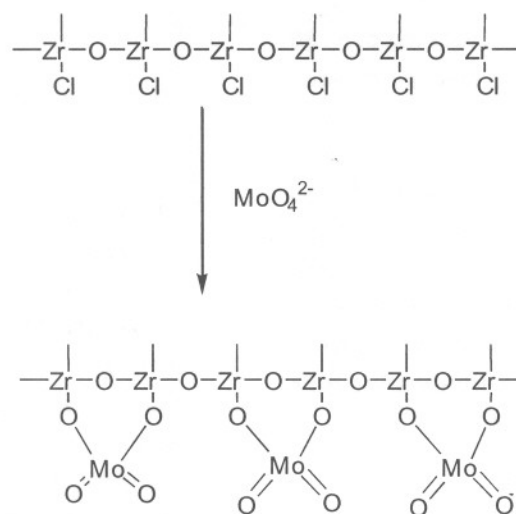
Gambar 4. Spektrum IR dari MBZ sebelum (A) dan sesudah dilapis dengan TEOS (B) dan setelah penyerapan Mo (C).

Gambar 4 menunjukkan spektrum IR MBZ sebelum dilapis TEOS (Gambar 4A.) dan MBZ setelah dilapis TEOS (Gambar 4B.). Pelapisan TEOS pada penyerap MBZ dimaksudkan untuk meningkatkan kekerasan MBZ. Pada spektrum IR MBZ setelah dilapis TEOS (Gambar 4B.) terlihat munculnya pita absorpsi pada bilangan gelombang baru yakni $1080 - 1099 \text{ cm}^{-1}$ yang merupakan absorpsi asimetri pita vibrasi Si-O-Si. Tiga spektra dari MBZ memperoleh pita absorpsi pada panjang gelombang $3000-3500 \text{ cm}^{-1}$ mewakili perenggangan O-H dari molekul kristal air begitu juga serapan kuat pada 1625 cm^{-1} mewakili *bending* H-O-H dari molekul air. Selain itu, pita absorpsi pada panjang gelombang 640 cm^{-1} merupakan salah satu identifikasi adanya monoklinik zirkonia (ZrO_2) [10] sedangkan pada panjang gelombang 475 cm^{-1} mewakili renggangan ikatan Zr-O. Secara kimia, TEOS akan bereaksi dengan H_2O (Persamaan 2) membentuk SiO_2 yang kemudian melapisi dan meningkatkan kekerasan permukaan MBZ.



Pengaruh penyerapan Mo pada MBZ-60 (MBZ yang telah dilapis TEOS dan dipanaskan selama 60 menit) dapat dilihat pada spektrum IR penyerap MBZ-60 (Gb 4C). Pita absorpsi IR MBZ-60 setelah penyerapan Mo. (Gambar 4.C) secara umum menunjukkan pola yang hampir mirip dengan MBZ-60 yang belum diperlakukan dengan Mo (Gambar 4B), namun pada spektrum IR MBZ-60 setelah penyerapan Mo terdapat pita absorpsi pada bilangan gelombang sekitar 950 cm^{-1} yang diperkirakan merupakan serapan dari Mo yang terikat pada MBZ-60 atau serapan dari antisimetri dan simetri ikatan O-Mo-O [10]. Penyerapan Mo pada material dapat dilihat dari serapan pita absorpsi pada daerah panjang gelombang 700 hingga 1000 cm^{-1} [9].

Gambar 5, memperlihatkan perkiraan reaksi yang terjadi saat proses penyerapan Mo oleh MBZ-60. Penyerapan Mo yang terjadi pada MBZ diduga melalui proses pergantian atom Cl yang terikat pada Zr dengan Mo pada rantai MBZ-60. Terlepasnya Cl ke dalam larutan mempengaruhi kondisi larutan yang sebelumnya netral (pH 7) menjadi asam (pH 5) seperti ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 5. Dugaan mekanisme penyerapan Mo

Tabel 3. Kondisi larutan MBZ sebelum dan sesudah penyrepan Mo/ Mo-99

Sampel	Sebelum		Setelah	
	warna	pH	warna	pH
MBZ-30	Bening	7	Biru	5
MBZ-60	Bening	7	Biru	4
MBZ-120	Bening	7	Biru	4
MBZ-240	Bening	7	Biru	5

KESIMPULAN

Optimasi penyerapan penyerap MBZ terhadap Mo/ Mo-99 dilakukan dengan melakukan variasi waktu pemanasan setelah pelapisan MBZ dengan TEOS. Hasil uji laboratorium yang memperlihatkan waktu pemanasan dengan mempengaruhi luas permukaan penyerap MBZ, dimana semakin lama waktu pemanasan maka semakin turun luas permukaannya MBZ yang dihasilkan. Hasil uji penyerapan Mo/ Mo-99 oleh MBZ (dengan waktu pemanasan 60 dan 120 menit setelah pelapisan dengan TEOS) memiliki kapasitas serap terhadap Mo/Mo-99 yang relatif tinggi (berturut-turut 196,3 mg dan 186 mg Mo/ g MBZ) dengan luas permukaan spesifik (berturut-turut 21,47 dan 19.5 mm²/g). Kapasitas serap terhadap Mo/ Mo-99m dan luas permukaan spesifik MBZ hasil sintesis pada penelitian ini masih jauh lebih rendah dibandingkan dengan penyerap PZC yang diproduksi Chiyoda Jepang, oleh sebab itu optimasi untuk meningkatkan kapasitas serap Mo/ Mo-99 dan luas permukaan spesifik MBZ dirasa masih perlu dilanjutkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lide, David R. Zirkonium, "CRC Handbook of chemistry and physics", New york : CRC Press, 200, pp. 42.
2. Stojilovic N., Bender ET, Ramsier RD., Surface Chemistry of Zirconium, Progress in surface Science 78, 2005, pp. 101-184.
3. Tanase M., Tatenuma K., Ishikawa K., et al., A ^{99m}Tc Generator Using a New Inorganic Polymer Adsorbent for (n,gamma) ⁹⁹Mo, *Applied Radiation Isotope*, Vol. 48 No. 5, 1997, pp. 607-611.
4. Davarpanah MR., Nosrati SA., Fazlali M., et al., Influence of drying conditions of zirconium molybdate gel on performance of ^{99m}Tc gel generator, *Applied Radiation and Isotopes* 67, 2009, pp. 1796-1801.
5. Mostafa M., Motaleb MA., Sakr TM., Labelling of ceftriaxone for infective inflammation imaging using ^{99m}Tc eluted from ⁹⁹Mo/^{99m}Tc generator based on zirconium molybdate, *Applied Radiation and Isotopes* 68, 2010, pp.1959-1963.

6. Lopes PR., Osso JA., Study of different adsorbent material for the preparation of generator systems of ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ^{188}W - ^{188}Re , *International Nuclear Atlantic Conference-INA*, 2009.
7. Cahakravaty R., et al., A Novel electrochemical technique for the production of clinical grade $^{99\text{m}}\text{Tc}$ using (n,gamma) ^{99}Mo , *Nuclear Medicine and Biology* 37, 2010, pp. 18-21
8. Chattopadhyay S., et al., A simple and rapid technique for recovery of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ from low specific activity (n,gamma) ^{99}Mo based on solvent extraction and column chromatography, *Applied Radiation and Isotope* 68, 2010, pp. 1-4
9. Goldberg S., et al., Sorption of Molybdenum on Oxides, clay Minerals, and Soils, *National Risk Management Research Laboratory. Adsorption of metals*, Geomedia, 1996, pp. 401-426.
10. Gusman F M, et al., Production optimization of $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ zirconium molybdate gel generators at semi-automatic device: DISIGEG, *Applied Radiation and Isotopes* 70, 2012, pp. 103-111.
11. Jin JB. et al., Feasibility Study on Mass Production of (n,gamma) ^{99}Mo , *IAEA-Research*, 2010, pp. 046.
12. Mustofa M., et al., Labelling of ceftriaxone for infective inflammation imaging using $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluted from Mo/Tc generator based on zirconium molybdate, *Applied Radiation and Isotope* 68, 2010, pp. 1959-1963.