

# **PROSIDING SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH XIV**

## **TEMA SEMINAR**

Pengembangan IPTEK Pengelolaan Limbah yang Inovatif,  
Handal, berkelanjutan dan Berwawasan Lingkungan  
Guna Meningkatkan Daya Saing Bangsa



**05 Oktober 2016**

Gedung IASTH Universitas Indonesia  
Salemba – Jakarta

**Penyelenggara**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN  
Dan  
Program Studi Ilmu Lingkungan - UI

**Diterbitkan Desember 2016**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas karunia-Nya Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV dapat diterbitkan. Seminar ini terselenggara atas kerjasama antara Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN dengan Program Studi Ilmu Lingkungan – Universitas Indonesia. Seminar dengan tema “Pengembangan IPTEK Pengelolaan Limbah yang Inovatif, Handal, Berkelanjutan dan Berwawasan Lingkungan Guna Meningkatkan Daya Saing Bangsa” telah dilaksanakan pada tanggal 5 Oktober 2016 di Gedung IASTH It.3 Universitas Indonesia, Salemba.

Seminar diselenggarakan sebagai media sosialisasi hasil penelitian dan pengembangan di bidang limbah radioaktif dan non radioaktif. Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV dijadikan sebagai media tukar menukar informasi dan pengalaman, ajang diskusi ilmiah, peningkatan kemitraan di antara peneliti, akademisi, dan praktisi industri, mempertajam visi pembuat kebijakan dan pengambil keputusan, serta peningkatan kesadaran kolektif terhadap pentingnya pengelolaan limbah yang inovatif, handal, berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Prosiding ini memuat karya tulis dari berbagai hasil penelitian mengenai pengelolaan limbah radioaktif, industri dan lingkungan. Makalah telah melalui proses evaluasi dari tim editor. Makalah dikelompokkan menjadi empat kelompok, yaitu kelompok pengelolaan limbah, disposal, lingkungan, dan perundang-undangan. Makalah-makalah tersebut berasal dari para peneliti di lingkungan BATAN, BAPETEN dan BPPT serta dosen dan mahasiswa di lingkungan UI, UNDIP, dan UNS.

Semoga penerbitan prosiding ini dapat digunakan sebagai data sekunder dalam pengembangan penelitian dimasa akan datang, serta dijadikan bahan acuan dalam kegiatan pengelolaan limbah. Akhir kata kepada semua pihak yang telah membantu, kami ucapkan terima kasih.

Jakarta, Desember 2016

Kepala  
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif  
Badan Tenaga Nuklir Nasional

Ir. Suryantoro, MT

## **SUSUNAN TIM EDITOR**

Ketua	:	Dr. Budi Setiawan	-	BATAN
Anggota	:	1. Dr. Sigit Santoso	-	BATAN
		2. Dr. Heny Suseno	-	BATAN
		3. Drs. Gunandjar, SU	-	BATAN
		4. Ir. Aisyah, MT	-	BATAN
		5. Dr. Djoko Hari Nugroho	-	BAPETEN
		6. Dr. Ir. Mohammad Hasroel Thayib, APU	-	UI
		7. Dr. Ir. Setyo Sarwanto Moersidik, DEA	-	UI

## SUSUNAN PANITIA

<b>Pengarah</b>	:	1. Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional	- BATAN
		2. Ketua Program Studi Ilmu Lingkungan UI	- UI
<b>Penanggung Jawab</b>	:	Ir. Suryantoro, MT	- BATAN
<b>Penyelenggara</b>			
Ketua	:	Budiyono, ST	- BATAN
Wakil Ketua	:	Moch. Romli, S.ST, MKKK	- BATAN
Sekretaris	:	1. Enggartati Budhy Hendarti, A.Md	- BATAN
		2. Pricillia Azhani, STP., M.Si.	- UI
		3. Titik Sundari, A.Md	- BATAN
Anggota	:	1. Widya Handayani, SE	- BATAN
		2. Sugianto, ST	- BATAN
		3. Wezia Berkademi, SE, M.Si	- UI
		4. M. Nurhasim, S.ST	- BATAN
		5. Eri Iswayanti, A.Md	- BATAN
		6. Agustinus Muryama, ST	- BATAN
		7. Budi Arisanto, A.Md	- BATAN
		8. Azhar Firdaus, S.Sos.I, M.Si	- UI
		9. Risdiyana, A.Md	- BATAN
		10. Adi Wijayanto, ST	- BATAN
		11. Arifin Istavara, S.ST	- BATAN
		12. CH. Susiana Atmaja, A.Md	- BATAN
		13. Imam Sasmito	- BATAN
		14. Moh. Cecep Cepi H., S.ST	- UI
		15. Parjono, ST	- BATAN
		16. Siswanto	- BATAN
		17. Sariyadi	- BATAN
		18. Maulana	- BAPETEN
		19. Drs. Hendro	- BATAN
		20. Sunardi, ST	- BATAN
		21. Gatot Sumartono, ST	- BATAN
		22. Ir. Eko Madi Parmanto	- BATAN
		23. Alphana Fridia Cessna, ST., M.Si	- UI
		24. Rukiaty	- BATAN
		25. Ade Rustiadam, S.ST	- BATAN
		26. Ajrieh Setiawan, S.ST	- BATAN
		27. Suparno, A.Md	- BATAN
		28. Suhartono, A.Md	- BATAN

## DAFTAR ISI

Kata Pengantar .....	i
Susunan Tim Editor .....	ii
Susunan Panitia .....	iii
Daftar Isi .....	iv
1 Pengembangan Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif Pra-Disposal : Imobilisasi Limbah Radioaktif Uranium Menggunakan Abu Batubara Sebagai Bahan Matriks <i>Synroc</i> .. <b>Gunandjar dan Yuli Purwanto</b>	1
2 Pengelolaan Limbah Cair Dengan Pendekatan Konsep Eko-Efisiensi: Analisis Hubungan Antara Penerapan Program <i>Cleaner Production</i> Di Area Produksi Dengan Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) .....	14
<b>Wahyu Wikandari, Roekmijati Widaningroem Soemantojo, Tri Edhi Budhi Soesilo</b>	
3 Pengolahan Limbah <i>Methylen Blue</i> Secara Fotokatalisis Dengan TiO <sub>2</sub> Dimodifikasi Fe Dan Zeolit .....	29
<b>Agus Salim Afrozi, Rahmat Salam, Auring R, Asep Nana S</b>	
4. Kinerja Konsorsium Bakteri Dari Sungai Opak Yogyakarta Dalam Reduksi Nitrat Dengan Sumber Karbon Yang Berbeda .....	37
<b>Hanies Ambarsari, Miswanto</b>	
5. Pengelolaan Limbah Radioaktif Hasil Dekontaminasi Di Instalasi Produksi Radioisotop Paska Berhenti Operasi .....	45
<b>Suhaedi Muhammad, Nazaroh, Rr.Djarwanti,RPS</b>	
6. Pemanfaatan Limbah Oli Bekas Sebagai Bahan Bakar Pembantu Peledakan (ANFO) Pada Kegiatan Pertambangan Batubara (Kasus Pemanfaatan Limbah Oli Bekas di PT. JMB Group) .....	52
<b>Danang Widiyanto</b>	
7. Sistem Pemurnian Helium Pada Reaktor Daya Experimental (RDE) Tipe HTR-10.....	60
<b>Aisyah, Yuli Purwanto</b>	
8. Pengolahan Limbah Daun Jati Kering Dari Desa Leyangan, Ungaran Menjadi Pulp Kering Dengan Proses Soda .....	68
<b>Linda Kusumaningrum, Heny Kusumayanti</b>	
9 Pembuatan Zat Warna Alami Dari Buah Mangrove <i>Spesies Rhizophora Stylosa</i> Sebagai Pewarna Batik Ramah Lingkungan Dalam Skala Pilot Plan .....	76
<b>Paryanto, Wusana Agung Wibowo, Moch Helmy Aditya</b>	
10 Konsentrasi Faktor Pada Bioakumulasi Plutonium Oleh Siput Macan ( <i>Babylonia Spirata L.</i> ) Di Perairan Teluk Jakarta .....	82
<b>Murdahayu Makmur , Muhammad Qowi Fikri, Defri Yona, Syarifah Hikmah JS</b>	
11. Pengaruh Koefisien Distribusi <sup>137</sup> Cs Pada Keselamatan Calon Tapak Fasilitas Disposasi Limbah Radioaktif .....	93
<b>Budi Setiawan, Dadang Suganda</b>	
12. Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Beberapa Adsorben .....	105
<b>Mirawaty, Gustru Nurliati</b>	

13	Studi Eksperimen Difusi Boron Dalam Bentonit Terkompaksi Dalam Kondisi Reduksi Oleh Fe .....	113
	<b>Mas Udi, Noria Ohkubo</b>	
14	Pengolahan Limbah Uranium Cair Dengan Resin Anion Amberlite IRA-400 Cl Dan Imobilisasi Resin Jenuh Menggunakan Polimer .....	118
	<b>Dwi Luhur Ibnu Saputra, Wati, Nurhayati</b>	
15	Studi Pemanfaatan Zeolit Sebagai Bahan Penopang Asam Oksalat Untuk Dekontaminasi Permukaan Aluminium .....	124
	<b>Sutoto</b>	
16	Karakteristik Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Sedang Reaktor Daya Eksperimental HTR-10 .....	129
	<b>Kuat Heriyanto</b>	
17	Pengembangan Penerapan Sistem Pengawasan Dalam Rangka Pencegahan Masuknya <i>Scrap Metal</i> Terkontaminasi Zat Radioaktif ke Dalam Wilayah Hukum Republik Indonesia .....	136
	<b>Nanang Triagung Edi Hermawan</b>	
18	Pengawasan Zirkon Di Indonesia .....	145
	<b>Moekhamad Alfiyan</b>	
19	Polimorfisme XPD23 Pada Pekerja Radiasi Medik .....	151
	<b>Wiwin Mailana, dan Yanti Lusiyantri</b>	
20	Pengukuran Radiasi Dan Konsentrasi <i>Naturally Occuring Radioactive Materials</i> (NORM) Pada Lahan Calon Tapak PLTU Batubara Kramatwatu Serang Banten .....	155
	<b>Sucipta, Risdiyana S., Arimuladi SP.</b>	
21	Perhitungan Jumlah Limbah Paska Dekomisioning Reaktor Triga Mark II Bandung .....	165
	<b>Sutoto, Kuat Heriyanto, Mulyono Daryoko</b>	
22	Fenomena Distribusi Radionuklida Kontaminan Pada Air Kanal Fasilitas KH-IPSB3 Pasca Perbaikan Filter <i>Skimer</i> .....	173
	<b>Titik Sundari, Darmawan Aji, Arifin</b>	
23	Difusi Radiocesium Oleh Tanah Urugan Sebagai Bahan Penutup Fasilitas Disposal Demo di Kawasan Nuklir Serpong : Karakterisasi <i>Dry Density</i> Tanah Permukaan di Lokasi Fasilitas Disposal Demo .....	179
	<b>Nurul Efri Ekaningrum, Budi Setiawan</b>	
24	Uji Integritas Kelongsong Bahan Bakar Nuklir Bekas Reaktor Dengan Metode Uji Cicip ..	186
	<b>Dyah Sulistyani Rahayu, Darmawan Aji</b>	
25	Verifikasi Penggunaan Library Origen 2.1 Untuk Perhitungan Inventori Teras Reaktor Tipe HTGR 10 MWth .....	194
	<b>Anis Rohanda, Jupiter S. Pane, Amir Hamzah</b>	
26	Penentuan Densitas Boron Karbida (B <sub>4</sub> C) Menggunakan Autopiknometer Dan Secara Metrologi .....	199
	<b>Torowati, Mu`nisatun, S., Yatno Dwi Agus</b>	
27	Evaluasi Pengukuran Tingkat Kontaminasi Permukaan Material Terkontaminasi Untuk Tujuan Klierens (Studi Kasus : Limbah Pelat Logam Hasil Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Fosfat Pt. Petrokimia Gresik) .....	205
	<b>Moch Romli, Mas'udi , Sugeng Purnomo, M. Nurhasyim, T. Sulistiyo H.N., Suhartono, Imam Sasmito, L. Kwin P</b>	

28	Evaluasi Tahanan Pembumian Instalasi Penyalur Petir Pada Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong .....	212
	<b>Adi Wijayanto, Arief Yuniarto, Budihari</b>	
29	Evaluasi Pengendalian Dosis Radiasi Pada Kegiatan <i>Dismantling</i> Dan Pengondisian Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan .....	217
	<b>Suhartono, Moch Romli, Arie Budianti, Adi Wijayanto, Mahmudin</b>	
30	Penerimaan Dosis Radiasi Sebagai Indikator Keselamatan Dalam Proses Pengolahan Limbah Radioaktif Tahun 2015 .....	224
	<b>L.Kwin Pudjiastuti, Hendro, Suhartono, Arie Budianti</b>	
31	Penerapan Nilai Batas Lepas Radioaktivitas ke Badan Air di Kawasan Nuklir Serpong ..	230
	<b>Arif Yuniarto, Aepah Nurbiyanti, Ambar Winansi, Ritayanti</b>	
32	Analisis Kegagalan Proses Pembangkit Uap Pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif Cair .....	241
	<b>Budiyono, Sugianto</b>	
33	Jaminan Mutu Layanan Evaluasi Dosis Perorangan Dengan <i>TLD Barc</i> di PTKMR-Batan ..	250
	<b>Nazaroh, Rofiq Syaifudin, Sri Subandini Lolaningrum, dan Nina Herlina</b>	
34	Perancangan Sistem Kendali <i>VAC Off-Gas</i> Pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif berbasis Programable Logic Control .....	260
	<b>Sugianto, Budiyono, Arifin Istavara</b>	
35	Uji Kelayakan Operasi Genset BRV20 RSG-Gas Setelah Dilakukan Perbaikan .....	268
	<b>Teguh Sulisty</b>	
36	Analisis Sistem Ventilasi Fasilitas Produksi 131I di PTRR-BATAN.....	278
	<b>Mulyono, Hermanto, Sofyan Sori, Sriyono</b>	
37	Aplikasi <i>Scada</i> Dengan Media Komunikasi Nirkabel 2.4 Ghz Untuk Pengendali Operasi Fasilitas Kanal Hubung Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KHIPSB3)	283
	<b>Parjono , Budiyono</b>	
38	Pembuatan Dan Pengujian <i>Burner</i> Pada Tungku Peleburan Timbal Untuk Fabrikasi <i>Shielding</i> Sumber Radioaktif Bekas Terbungkus .....	292
	<b>Arifin Istavara, Jonner Sitompul, Sugianto</b>	
39	Aplikasi Reaktor Pada <i>Capacitor Bank</i> Sebagai Peredam Harmonik Catu Daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif .....	299
	<b>Jonner Sitompul, Sugianto</b>	

## KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGUNAKAN BEBERAPA ADSORBEN

Mirawaty dan Gustrri Nurliati

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310  
Email: mirawaty@batan.go.id

### ABSTRAK

**KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGGUNAKAN BEBERAPA ADSORBEN.** Limbah radioaktif cair dapat dihasilkan dari kegiatan pencucian alat-alat terkontaminasi dan zat radioaktif yang sudah tidak terpakai. Pusat Teknologi Pengolahan Limbah (PTLR) pada tahun 2014 menerima limbah cair mencapai 64.240 liter, sebagian besar dari kegiatan operasi reaktor yang mengandung radionuklida Cs-137 dan Co-60. Pengolahan limbah radioaktif cair di PTLR dilakukan dengan metode evaporasi. Jika dalam pengolahan terjadi gangguan pada alat penunjang seperti media dan energy, maka proses pengolahan limbah radioaktif cair akan terhambat. Hambatan tersebut harus diatasi dengan mengembangkan metode lain sebagai penunjang metode pengolahan yang ada. Kajian ini untuk mencari alternatif pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan adsorben dilakukan dengan cara mencari literatur perbandingan berdasarkan metode yang sama di beberapa negara. Kajian dari beberapa negara diketahui bahwa pengolahan limbah radioaktif cair yang banyak digunakan adalah zeolit, resin penukar ion, bentonit, serta modifikasinya. Dari segi ekonomis, Zeolit lebih baik digunakan karena zeolit yang merupakan bahan alam yang berlimpah di Indonesia. Zeolit dan resin merupakan adsorben yang mempunyai nilai KTK yang relatif lebih besar dibandingkan adsorben lainnya yaitu 0,9 – 2,2 meq/g. Berdasarkan karakteristik limbah radioaktif cair yang diproses di PTLR adsorben yang lebih cocok digunakan adalah zeolit dan resin. Hasil kajian dapat diaplikasikan dengan penelitian lebih lanjut di laboratorium menggunakan limbah yang diolah di PTLR. Sehingga dapat dipastikan metode yang diperoleh dari kajian dapat dipalikasiikan di PTLR.

Kata kunci : limbah radioaktif, adsorben, resin penukar ion, zeolit, bentonit

### ABSTRACT

**LIQUID RADIOACTIVE WASTE STUDY BASED ON VARIOUS ADSORBENTS.** Liquid radioactive waste could generate from the washing process of contaminated equipment and unused liquid radioactive substances. In 2014 Center for Radioactive Waste Technology (CRWT) received 64.240 litres of radioactive waste from reactor activity which mostly consist of Cs-137 and Co-60. Radioactive waste treatment at CRWT is done using evaporation method. If during the treatment process, a malfunction at the supporting apparatus such as the media and power availability occurred, the radioactive waste treatment process will be halted. The obstacle has to be overcome by developing another method as the support of the existing treatment method. The study to find an alternative method of radioactive treatment using adsorbent was done by investigating the available literatures that based on method similarity employed in several countries. This the study from several countries found that the radioactive waste treatments that commonly used are zeolit, ion exchange resin, bentonit and its modifications. Economically, the zeolit is much better to utilize since it is a natural resource and has an abundant availability. The zeolit and resin are adsorbent that has relatively high KTK value compare to other adsorbents, which is 0,9 – 2,2 meq/g. Based on the liquid radioactive waste characteristic that process at CRWT, the suitable adsorbent to utilize are zeolit and resin. Results of the study can be applied to further study at laboratory scale using the existing radioactive waste that process at CRWT. Therefore, the method that found in the study is applicable at CRWT.

Keyword : radioactive waste, adsorbent, ion exchange resin, zeolite, bentonite

### PENDAHULUAN

Limbah radioaktif cair merupakan limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan pencucian alat-alat yang terkontaminasi, cairan zat radioaktif yang sudah tidak digunakan, ekskresi dari pasien yang sedang pengobatan dengan zat radioaktif, termasuk ekskresi dari binatang percobaan, termasuk aerosol atau gas yang timbul karena penguapan cairan atau dari pembakaran bahan yang dapat terbakar, kegiatan reaktor, dan lain lain. Limbah cair yang di

terima oleh Pusat Teknologi Pengolahan Limbah (PTLR) pada tahun 2014 mencapai 64.240 liter sebagian besar dari kegiatan reaktor yang mengandung radionuklida Cs-137 dan Co-60[1].

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair antara lain proses filtrasi, penukar ion, evaporasi, proses kimia (flokulasi, koagulasi, presipitasi, sedimentasi). Pemilihan metode pengolahan tersebut perlu memperhatikan karakteristik dari limbah yang akan diolah. Pengolahan limbah radioaktif cair yang di terima PTLR dilakukan



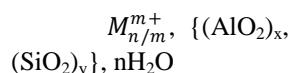
dengan metode evaporasi yang mempunyai spesifikasi 0,75 m<sup>3</sup>/jam dengan 4 tangki berkapasitas 50 m<sup>3</sup> dan menggunakan bahan bakar sebanyak 100 liter/jam. Kondisi alat evaporasi saat ini berfungsi dengan baik, namun peralatan penunjang (media dan suplai energi) sering mengalami kerusakan yang menyebabkan proses pengolahan limbah radioaktif cair sering terhambat. Dengan sering adanya hambatan yang terjadi maka diperlukan metode lain yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair sebagai penunjang alat tersebut.

Pada penelitian ini akan dipelajari pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan kolom penukar ion dengan isian adsorben. Proses menggunakan penukar ion mempunyai kelebihan seperti stabilitas kimia, termal dan radiasi yang baik dan selektivitas yang tinggi[2]. Penelitian ini akan difokuskan dengan pengkajian pemilihan bahan adsorben sebagai isian kolom yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair. Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan kolom penukar ion dengan isian adsorben telah banyak dilakukan di beberapa Negara, seperti India [3], China [4], Jepang [5], Pakistan [6], Egypt[7], Korea [5, 6], Brazil [10]. Adsorben yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair seperti zeolit [2, 3, 4, 10, 11], resin penukar ion [6, 8, 12, 13, 14, 15], bentonit [5, 11, 12].

## TINJAUAN PUSTAKA

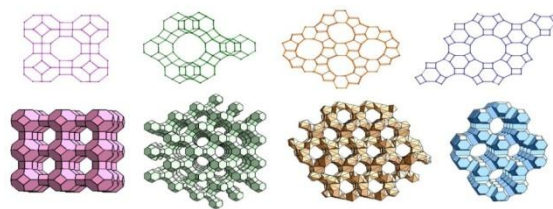
### Zeolit

Zeolit adalah mineral kristal alumina silica tetrahidrat berpori yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk oleh tetrahedral [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> dan [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup> yang saling terhubung oleh atom-atom oksigen, sehingga membentuk kerangka tiga dimensi terbuka yang membentuk rongga-rongga, yang didalamnya terisi oleh ion-ion logam, biasanya adalah logam-logam alkali atau alkali tanah dan molekul air yang dapat bergerak bebas [19,20]. Struktur zeolit yang bermuatan negatif dan berongga terbuka/berpori seperti pada Gambar 1. Zeolit mempunyai kapasitas tukar kation 1,5 – 2 meq/g dan komposisi zeolit terdiri 3 komponen di bawah ini[1, 21]:



Dimana :

M adalah kation bervalensi n, (AlO<sub>2</sub>)<sub>x</sub>, (SiO<sub>2</sub>)<sub>y</sub> adalah kerangka zeolit yang bermuatan negatif, H<sub>2</sub>O adalah molekul air yang terhidrat dalam kerangka zeolit.



Gambar 1. Struktur Zeolit [1]

Zeolit dibedakan menjadi dua yaitu[21]:

#### 1. Zeolit alam

- Zeolit alam mengandung kation-kation K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> atau Mg<sup>2+</sup>
- Mengandung molekul air dalam pori dan oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) bebas di permukaan yang dapat menutupi pori-pori atau bagian aktif dari zeolit sehingga dapat menurunkan kapasitas adsorpsi dan sifat katalis dari zeolit tersebut.
- Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan sifat katalis zeolit dapat dilakukan dengan dua cara yaitu cara fisika dan kimia.
- Aktivasi zeolit dengan cara fisika dilakukan dengan pemanasan pada suhu 300-400°C dengan udara panas atau dengan system vakum untuk melepaskan molekul air.
- Sedangkan aktivasi zeolit dengan cara kimia dilakukan dengan pencucian zeolit dengan larutan Na<sub>2</sub>EDTA atau asam-asam anorganik (HF, HCl, dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) untuk menghilangkan oksida-oksida pengotor yang menutupi permukaan pori.

#### 2. Zeolit sintetik

- Zeolit sintetik mengandung kation-kation K<sup>+</sup> atau Na<sup>+</sup>

Kandungan Si dan Al dalam zeolit berbeda-beda tiap jenis zeolit tergantung rasio Si dan Al yang merupakan perbandingan jumlah atom Si terhadap atom Al di dalam kerangka zeolit. Adanya perubahan rasio Si/Al dari zeolit akan mengubah muatan zeolit sehingga akan mengubah kation penyeimbang dari zeolit. Perbedaan rasio Si/Al akan mempengaruhi sifat dari zeolit itu sendiri, lebih sedikit atom Al maka akan lebih sedikit muatan negatif sehingga lebih sedikit juga kation penyeimbang yang ada, bersifat hidrofobik dan mempunyai afinitas terhadap hidrokarbon.

Zeolit dapat dimanfaatkan sebagai [21]:

1. Sebagai pendehidrasi, zeolit merupakan kristalin yang salah satu komponennya adalah air. Air yang terkandung dalam pori zeolit tersebut dapat lepas dengan proses pemanasan pada suhu 300 hingga 400°C[3,20]. Pemanasan pada suhu tersebut

air dapat keluar dari pori-pori zeolit dimana kation akan berpindah posisi ke tempat yang mempunyai bilangan koordinasi lebih rendah, sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan.

2. Sebagai penukar ion, kation pada zeolit mempunyai sifat *exchangeable cations* yaitu dapat bergerak dan dipertukarkan dengan ion lain yang terdapat dalam larutan. *Clinoptilolite* merupakan zeolit alam yang digunakan untuk mengolah limbah Cs-137 dari limbah radioaktif, Zeolit A merupakan zeolit sintesis yang mempunyai rasio Si/Al adalah satu dan dapat digunakan untuk mengisolasi stronsium. Modifikasi zeolit (kalsinasi zeolit-H pada suhu 550°C) juga dapat digunakan sebagai adsorben anion ( $\text{NO}^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , dan  $\text{SO}^{4-}$ )
3. Sebagai adsorben, dimana zeolit mempunyai struktur yang berpori terbuka dengan luas permukaan yang besar sehingga mampu mengadsorb yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk pemurnian dan pemisahan. Selain itu zeolit dapat digunakan sebagai adsorben zat warna dan untuk pemucat minyak sawit mentah.
4. Sebagai katalis, suatu katalis dipengaruhi oleh luas permukaan yang sangat besar sehingga bagian katalitiknya semakin besar, seperti katalis amorf yang dibuat dalam bentuk serbuk. Sedangkan zeolit yang mempunyai rongga memberikan luas permukaan internal yang sangat luas sehingga dapat menampung 100 kali molekul lebih banyak daripada katalis amorf.

Zeolit alam merupakan bahan mineral yang berwarna hijau keputihan dan banyak ditemukan di alam dalam bentuk sedimentasi dan mempunyai rasio Si/Al yang rendah. Namun ada beberapa yang mempunyai porositasnya yang tinggi seperti *clinoptilolite* dan *mordenite*. Kedua jenis zeolit tersebut banyak digunakan sebagai adsorben dan penukar ion untuk pengolahan limbah. Contoh zeolit alam mengandung mineral *analism*, *laumondit*, dan *modernit*.

Zeolit sintesis merupakan zeolit yang dimodifikasi untuk mendapatkan karakter yang sama dengan zeolit alam dan meningkatkan kapasitas fungsinya. Zeolit sintesis sangat bergantung pada jumlah Al dan Si dari bahan penyusunnya. Menurut jumlah komponen Si dan Al sebagai penyusun zeolit, maka zeolit dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu [1,19]:

1. Zeolit sintesis dengan kadar Si rendah.

Zeolit sintesis jenis ini banyak mengandung Al, berpori, mempunyai nilai ekonomi yang tinggi karena efektif untuk pemisahan dengan kapasitas besar. Volume

pori-porinya dapat mencapai  $0,5 \text{ cm}^3$  setiap  $1 \text{ cm}^3$  volume zeolit.

2. Zeolit sintesis dengan kadar Si sedang.

Jenis zeolit modernit mempunyai perbandingan Si/Al = 5, sangat stabil, maka diusahakan membuat zeolit Y dengan perbandingan Si/Al 1-3. Contoh zeolit sintesis jenis ini adalah zeolit omega.

3. Zeolit sintesis dengan kadar Si tinggi.

Zeolit jenis ini sangat higroskopis dan menyerap molekul non polar sehingga baik untuk digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon.

## Bentonit

Bentonit merupakan istilah pada lempung yang mengandung *monmorilonit* dalam dunia perdagangan dan mengandung dioktahedral dan mempunyai kapasitas tukar kation 0,4 – 1,2 meq/g. Bentonite berdasarkan kandungan Al-Si dikelompokkan sebagai berikut [19]:

1. *Activated clay*, kurang memiliki pemucat namun dapat ditingkatkan melalui pengolahan tertentu
2. *Fullers earth*, digunakan untuk pembersih bahan wool dari lemak

Bentonit juga dikelompokkan berdasarkan tipenya seperti dibawah ini:

1. Tipe *Wyoming* (Na-bentonit- bentonit *swelling*)

Bentonit ini mempunyai dara mengembang hingga 8x jika terkena air dan akan tetap terdispersi di dalam air, juga mempunyai sifat mampu membentuk suspensi kental jika bercampur dengan air. Bentonit tipe ini dimanfaatkan sebagai bahan perekat, pengisi (filler), lumpur bor.

2. Mg (Ca-bentonit - bentonit tidak *swelling*)

Bentonit ini mengembang sedikit jika ada air, terdispersi dalam air, secara alami atau diaktifkan mempunyai sifat penyerap yang baik. Bentonit tipe ini digunakan sebagai bahan penyerap.

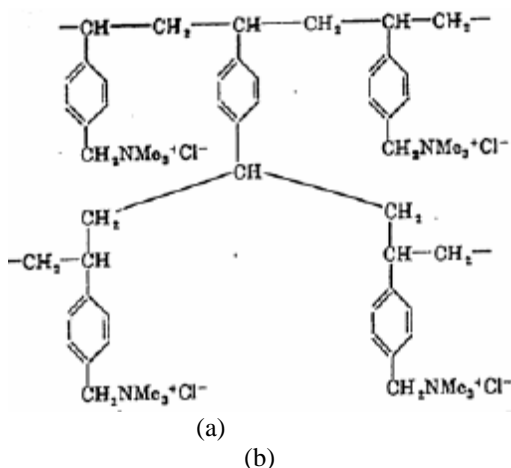
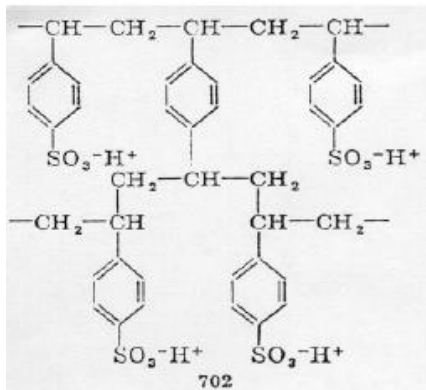
Bentonit di bidang nuklir digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah dan sebagai bahan buffer material (bahan isian) dalam penyimpanan limbah pada tanah dangkal dan tanah dalam. Struktur kristal bentonit mempunyai 2 lapisan yaitu lapisan silica (atom silica dalam bentuk tetrahedral) dan lapisan Aluminium (atom aluminium dalam bentuk oktahedral) [20].

**Resin**

Resin merupakan hidrokarbon terpolimerisasi yang mempunyai ikatan silang dan mengandung kation/anion yang dapat dipertukarkan. Berdasarkan gugus fungsionalnya, resin penukar ion terbagi menjadi dua yaitu resin penukar kation dan resin penukar anion. Resin penukar kation mengandung kation yang dapat dipertukarkan, sedangkan resin penukar anion mengandung anion yang dapat dipertukarkan. Secara umum rumus struktur resin penukar ion kation dan anion ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Resin mempunyai sifat sebagai berikut [3,4,20]:

1. Sebagai kapasitas penukar ion dengan kapasitas tukar kation 0,9-2,2 meq/g.
2. Selektivitas, dimana akan menentukan dapat atau tidaknya suatu ion terlepas
3. Derajat ikat silang (*crosslinking*) yang mempengaruhi kapasitas tukar ion
4. Porositas yang berbanding lurus dengan derajat ikat silang
5. Kestabilan resin meliputi kekuatan dan ketahanan gesekan.

Resin di industri nuklir dapat digunakan untuk sistem purifikasi air pendingin di reaktor dan pengolahan limbah radioaktif.



Gambar 1. Resin Penukar Ion (a) Kation (b) Anion

**METODE**

Kajian pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan metode penukar ion menggunakan beberapa adsorben yang dilakukan dengan proses studi literatur dari penelitian yang dilakukan di beberapa negara. Selanjutnya dicari adsorben yang dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif cair dengan karakteristik yang ada di PTLR.

**PEMBAHASAN**

**Zeolit**

Di India telah dilakukan penelitian zeolit yang digunakan untuk pengolah limbah radioaktif cair. Dipelajari kinetika, difusi dan keseimbangan proses pertukaran ion bahan zeolit sintesis komersial dengan proses bath dan kolom. Bahan zeolit komersial digunakan adalah 13X, AR-1,4A (dari Associated Cement Company, Thane, Bombay), dan ZSM-5 (dari United Catalysts India Limited, Baroda). Karakteristik dari zeolit 13X, AR-1,4A berbentuk seperti *vermicelli chips* dengan panjang 3-10 mm dan diameter 2 mm (dibuat ukuran butir 0,25-0,30 mm), sedangkan zeolit ZSM-5 berupa bubuk putih dalam bentuk *binderless*. Hasil karakterisasi dari zeolit yang digunakan dengan kandungan Si dan Al ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Zeolit Persen Berat Antara Atom Si/Al dan Oksidanya [3]

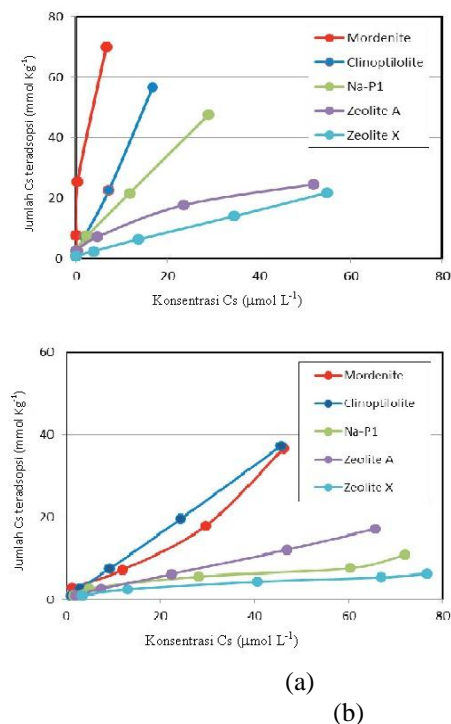
Komponen	13X	AR-1	4A	ZSM-5
Si (SiO2)	14.2 (30.4)	30.3 (64.9)	14.3 (30.6)	35.7 (76.5)
Al (Al2O3)	12.0 (22.7)	6.5 (12.3)	13.1 (24.7)	4.0 (7.6)
Na (Na2O)	10.9 (14.7)	5.8 (7.8)	11.5 (15.5)	3.6 (4.9)
Loss on Ignition (LOI)	16.4	8.6	14.6	6.5

Penelitian untuk menentukan kinetika proses pertukaran ion dilakukan secara bath dengan pengadukan dan serapan dikendalikan oleh difusi intra-partikel. Sedangkan proses secara kolom dilakukan menggunakan limbah yang sebenarnya dengan *bed volume* 1,5 ml. Hasil penelitian secara bath, zeolit dengan kapastias tukar tinggi untuk pengolahan limbah radioaktif mengandung Cs adalah zeolit 13X dan 4A. Sedangkan secara kolom menghasilkan zeolit AR-1 dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif yang mengandung padatan terlarut rendah dan tidak ada zeolit dapat digunakan untuk mengolah limbah mengandung padatan terlarut tinggi [3].

Zeolit ZSM-5 merupakan zeolit keluran pabrik yang berdasarkan hasil FT-IR spektrum mempunyai karakteristik seperti zeolit murni.

Zeolit ini mempunyai kemampuan yang tinggi untuk adsorpsi Pb (II) dan U (VI) dan dapat juga digunakan untuk regenerasi. Metode menentukan kapasitas adsorpsi dilakukan secara batch, zeolit ZSM-5 dan  $\text{NaNO}_3$  didiamkan selama 24 jam, dimasukkan dalam tabung tes dengan variasi pH, dikocok selama 48 jam. Kemudian dipisahkan antara cairan dan endapan, cairan dianalisis dengan spektrofotometri. Kapasitas adsorpsi zeolit ZSM-5 terhadap Pb (II) dan U (VI) meningkat dengan meningkatnya pH dan menurunnya kekuatan ion yaitu kapasitas adsorpsi maksimum guntukPb(II) 20,1mg/danuntukU(VI) 37,6mg/gpada kondisi pH3,0dan0,010mol/L $\text{NaNO}_3$ [4].

Beberapa jenis zeolit dan modifikasinya dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang mengandung  $\text{Cs}^+$  diantaranya mordenit, klinoptilolit, zeolit A sintetik (Linde tipe A dari WAKO Jepang), sintetik zeolit X (dari WAKO Jepang) dan zeolit buatan Na-P1 sebagai referensi (zeolit buatan yang terbuat dari fly ash batubara ditambahkan NaOH). Hasil penelitian Johan dkk menunjukkan kapasitas tukar kation (KTK) zeolit alam lebih rendah dibandingkan zeolit sintetis dan buatan, sedangkan kapasitas adsorpsi  $\text{Cs}^+$  jauh lebih besar dari zeolit sintetis dan buatan. Urutan kapasitas adsorpsi  $\text{Cs}^+$  adalah mordenit, klinoptilolit, Na-P1, zeolit A, Zeolit X [5]. Zeolit yang mengandung ferrierite dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif yang mengandung stronsium sama efektifnya dengan zeolit klinoptilolit[12].



Gambar 3. (a) adsorpsi Cs dalam 0,05 M NaCl  
(b) adsorpsi Cs dalam 0,05 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$   
[5]

Hasil penelitian Endro,zeolit digunakan untuk mengadsorpsi Pb pada limbah B3. Zeolit dengan ukuran (-60+80) mesh yang diaktivasi menggunakan pemanasan  $250^\circ\text{C}$  memberikan nilai KTK dari zeolit sebesar 1,904 meq/g. Sedangkan zeolit yang diaktivasi menggunakan larutan  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0,1M memberikan nilai KTK total sebesar 1,921 meq/g [11].

### Bentonit

Bentonit banyak digunakan sebagai bahan *buffer* (bahan isian) dalam penyimpanan limbah radioaktif, sedangkan dalam pengolahan limbah radioaktif cair digunakan untuk menyerap radionuklida-radionuklida. Namun sifatnya yang mudah mengalami *swelling* bentonit dalam penggunaannya harus dimodifikasi salah satunya dengan cara dipilar (dibuat lapisan yang berpori)[20].

Bentonit alam yang dimodifikasi menggunakan 3-aminopropyltriethoxysilane (APS) dan 3,2-aminoetilaminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung Pb. Hasil penelitian menggunakan metode batch dan kolom dan menunjukkan kapasitas adsorpsi bentonit alam, bentonit – APS dan bentonit – AEAPS masing-masing 20,6843, 27,6524, dan 29,5413 mg/g [10]. Bentonit alam diaktivasi menggunakan termal (TA), asam (AA), dan gabungan termal-asam (ATA) untuk pengolahan limbah logam. Hasil aktivasi dapat meningkatkan luas permukaan dan porositas bentonit alam [17]. Sedangkan modifikasi menggunakan organo-bentonit dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dengan meningkatnya panjang rantai alkil [18].

Bentonit lokal dari Pakistas digunakan untuk penyerapan limbah yang mengandung Cs, dilakukan dengan parameter waktu kontak, pH dan beberapa parameter termodinamika. Penelitian dilakukan secara batch dengan 0,5 g bentonite dalam 10 ml larutan yang mengandung Cs diaduk dengan kecepatan 4500 rpm selama waktu dan pH yang divariasikan, selanjutnya supernatan dianalisis. Hasil penelitian pengaruh waktu kontak menunjukkan tingkat serapan cesium yang cepat, pengaruh pH menunjukkan nilai koefisien distribusi lebih rendah, pengaruh jumlah bentonit dapat meningkatkan penyerapan Cs dan pengaruh konsentrasi larutan Cs menunjukkan nilai koefisien distribusi menurun dengan meningkatnya konsentrasi larutan Cs. Nilai  $\Delta H^\circ = -32,29 \text{ KJ / mol}$  dan  $\Delta G^\circ = -13,16 \text{ KJ / mol}$  pada 298 K menunjukkan bahwa serapan cesium pada bentonit adalah eksotermis dan proses spontan. Sedangkan nilai AG menjadi lebih negatif pada suhu yang lebih tinggi menyebabkan penyerapan Cs berkurang, dan

adanya kation  $K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$  menurunkan penyerapan Cs pada bentonit [22].

Penelitian pengolahan limbah yang mengandung Sr menggunakan bentonit dengan metode yang sama diatas, menunjukkan Nilai  $\Delta H^\circ = 30,62 \text{ KJ / mol}$  dan  $\Delta G^\circ = -10,69 \text{ KJ / mol}$  pada 298 K. Hal tersebut menunjukkan bahwa serapan Sr pada bentonit adalah proses spontan. Nilai AG menjadi lebih negatif pada suhu yang lebih tinggi sehingga menunjukkan proses penyerapan lebih menguntungkan pada suhu yang lebih tinggi. Adanya kation  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$  menurunkan penyerapan Sr pada bentonit [6].

### Resin

Pengkajian termodinamika dan kinetika resin Amberlite IRA-910 yang digunakan untuk adsorpsi uranium (VI) dengan metode secara batch dengan variasi konsentrasi, keasaman, waktu kontak, dan suhu. Hasil pengkajian menunjukkan nilai  $\Delta H^\circ$  dan  $\Delta G^\circ$  adsorpsi uranium pada amberlite IRA-910 menghasilkan adsorpsi panas endotermik [13]. Limbah yang mengandung uranium juga dapat diadsorpsi menggunakan resin penukar anion Amberlite CG-400. Adsorpsi uranium mencapai kapasitas maksimum dengan laju alir 0,2 ml/menit, tinggi bed volume 9,1 cm (4 g resin) dan untuk recovery uranium menggunakan eluen 0,5 mol/l  $HNO_3$  [23]. Pada penelitian lain dipelajari juga dengan adanya anion fosfat menunjukkan pH optimum 3,5 dan kinetika penyerapan uranium adalah proses cepat dan penyerapan secara isotherm. Kapasitas penyerapan uranium tanpa adanya anion fosfat 57,14 dan adanya anion fosfat 112,36 mg/g [24].

Pengolahan limbah radioaktif yang mengandung Cs dan Co menggunakan resin penukar kation jenis lewatis yang dilakukan secara bath dan kolom. Kapasitas penyerapan optimum Cs dan Co menggunakan resin lewatis pada pH optimum 6, kinetika keseimbangan pada waktu 120 menit dan nilai afinitas resin lewatis terhadap Cs lebih besar dari Co, kapasitas penyerapan juga di pengaruhi laju alir dan tinggi kolom [7]. Resin yang mengandung konsentrasi C-14 tinggi mempunyai nilai afinitas adsorpsi terhadap  $Co^{2+}$  dan  $Cs^+$  relatif lebih tinggi dari kation lain [8].

Limbah radioaktif yang mengandung garam asam mineral dapat mempengaruhi proses penyerapan menggunakan resin, penelitian yang dilakukan di Rusia resin dimodifikasi dengan menambahkan ligan asam mineral yang mampu meningkatkan efisiensi tukar kation pada pengolahan limbah tersebut. Penambahan ligan anorganik pada resin dapat mempengaruhi efisiensi tukar kation pengolahan limbah yaitu untuk menekan terjadinya proses

pengkomplekan. Untuk menekan hal tersebut dalam penelitian yang dilakukan A. S. Chugunov menggunakan resin penukar kation dengan bentuk terprotonasi sehingga dapat mengurangi densitas ligan dengan koreksi pH [15].

Resin dowex yang dimodifikasi dengan penambahan Fe digunakan untuk menghilangkan nitrat, penambahan sulfat yang dapat menurunkan kapasitas adsorpsi nitrat sedangkan penambahan KCl dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi nitrat hingga 95% [9]. Resin amberlit IRA 402 digunakan untuk adsorpsi uranium seperti yang dilakukan penelitian oleh M. Solgy menunjukkan kesetimbangan adsorpsi mengikuti model isotherm Freundlich dengan kapasitas adsorpsi maksimum resin amberlit untuk uranium menjadi 213 mg/g pada suhu 25°C [16].

Resin amberlit IR 120 dapat digunakan untuk adsorpsi Cs yang dipengaruhi dengan pH dan suhu dimana pengaruh pH awal ion Cs signifikan terhadap kapasitas adsorpsi dibandingkan pengaruh suhu. Adsorpsi Cs menggunakan resin amberlit IR-120 lebih maksimal pada kondisi isotherm dan berdasarkan persamaan Langmuir cocok untuk adsorpsi isotherm dengan komponen tunggal. Sedangkan untuk adsorpsi heterogen untuk Cs meningkat dengan meningkatnya suhu dan penurunan pH [25]. Sejumlah penelitian resin modifikasi *spherical resorcinol-formaldehyde* (SRF) sangat efektif digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung Cs-137 [14].

Data limbah radioaktif cair yang diterima PTLR pada tahun 2013 dan 2014 sebagian besar mengandung Cs dan Co [1]. Pemilihan adsorben yang dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif berdasarkan kapasitas tukar kation yang tinggi. Berdasarkan pengalaman beberapa Negara, adsorben yang sering digunakan untuk mengolah limbah radioaktif cair adalah zeolit dan resin penukar ion yang mempunyai kapasitas tukar kation yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben yang lain.

### KESIMPULAN

Hasil kajian pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan adsorben dari beberapa negara, adsorben yang banyak digunakan adalah zeolit, resin penukar ion, bentonit, dan lain-lain. Dari segi ekonomis untuk pengolahan limbah radioaktif dapat digunakan zeolit yang merupakan bahan alam yang berlimpah di Indonesia. Zeolit dan resin merupakan adsorben yang mempunyai nilai KTK yang relatif lebih besar dibandingkan adsorben lainnya yaitu 0,9 – 2,2 meq/g. Berdasarkan karakteristik limbah radioaktif cair yang diproses di PTLR, adsorben yang dapat digunakan adalah

zeolit dan resin. Hasil kajian dapat diaplikasikan dengan penelitian lebih lanjut dilaboratorium menggunakan limbah yang diolah di PTLR. Sehingga dapat dipastikan metode yang diperoleh dari kajian dapat dipalिकासikan di PTLR.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. A. Muziyawati, "Pengelolaan Data Limbah Radioaktif Di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif," in *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2014*, ISSN 0852-2979, 2015, pp. 259–271.
2. R. O. A. Rahman, H. A. Ibrahim, and Y.-T. Hung, "Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review," *Water*, vol. 3, no. 4, pp. 551–565, 2011.
3. P. K. Sinha, P. K. Panicker, R. V. Amalraj, and V. Krishnasamy, "Treatment of radioactive liquid waste containing caesium by indigenously available synthetic zeolites: A comparative study," *Waste Manag.*, vol. 15, no. 2, pp. 149–157, 1995.
4. X. Wang, D. Shao, G. Hou, X. Wang, A. Alsaedi, and B. Ahmad, "Uptake of Pb(II) and U(VI) ions from aqueous solutions by the ZSM-5 zeolite," *J. Mol. Liq.*, vol. 207, pp. 338–342, 2015.
5. E. Johan, T. Yamada, M. W. Munthali, P. Kabwadza-Corner, H. Aono, and N. Matsue, "Natural Zeolites as Potential Materials for Decontamination of Radioactive Cesium," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 28, no. Sustain 2014, pp. 52–56, 2015.
6. S. A. Khan and M. A. Khan, "Sorptions of strontium on bentonite," *Waste Manag.*, vol. 15, no. 8, pp. 641–650, Jan. 1995.
7. H. A. Ibrahim, "Sorptive Removal of Cesium and Cobalt Ions in a Fixed bed Column Using Lewatit S100 Cation Exchange Resin," vol. 47, no. 13, pp. 77–93, 2014.
8. S.-C. PARK, H.-R. CHO, J.-H. LEE, H.-Y. YANG, and O.-B. YANG, "A STUDY ON ADSORPTION AND DESORPTION BEHAVIORS OF  $^{14}\text{C}$  FROM A MIXED BED RESIN," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 46, no. 6, pp. 847–856, Dec. 2014.
9. S. Rengaraj, K.-H. Yeon, S.-Y. Kang, J.-U. Lee, K.-W. Kim, and S.-H. Moon, "Studies on adsorptive removal of Co(II), Cr(III) and Ni(II) by IRN77 cation-exchange resin," *J. Hazard. Mater.*, vol. 92, no. 2, pp. 185–198, May 2002.
10. D. J. L. Guerra, I. Mello, R. Resende, and R. Silva, "Application as absorbents of natural and functionalized Brazilian bentonite in  $\text{Pb}^{2+}$  adsorption: Equilibrium, kinetic, pH, and thermodynamic effects," *Water Resour. Ind.*, vol. 4, pp. 32–50, Dec. 2013.
11. E. Kismolo, "Karakterisasi Kapasitas Tukar Kation Zeolit Untuk Pengolahan Limbah B3 Cair," in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2012*, 2012, pp. 245–251.
12. A. Dyer and D. Keir, "Nuclear waste treatments by zeolites," *Zeolites*, vol. 4, no. 7, pp. 215–218, 1984.
13. A. Rahmati, A. Ghaemi, and M. Samadfam, "Kinetic and thermodynamic studies of uranium(VI) adsorption using Amberlite IRA-910 resin," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 42–48, Jan. 2012.
14. RL Russell DE Rinehart RA Peterson, "Ion Exchange Kinetics Testing with SRF Resin," April, United States of America: Pacific Nortest National Laboratory, 2012, p. .
15. A. S. Chugunov, A. V. Rummyantsev, V. A. Vinnitskiy, and A. F. Nechaev, "Effects of inorganic ligands on the efficiency of ion-exchange treatment of radioactive waste," *Nucl. Energy Technol.*, Feb. 2016.
16. M. Solgy, M. Taghizadeh, and D. Ghoddocynejad, "Adsorption of uranium(VI) from sulphate solutions using Amberlite IRA-402 resin: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 75, pp. 132–138, Jan. 2015.
17. M. Toor, B. Jin, S. Dai, and V. Vimonses, "Activating natural bentonite as a cost-effective adsorbent for removal of Congo-red in wastewater," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 21, pp. 653–661, Jan. 2015.
18. H. Zaghouane-Boudiaf, M. Boutahala, S. Sahnoun, C. Tiar, and F. Gomri, "Adsorption characteristics, isotherm, kinetics, and diffusion of modified natural bentonite for removing the 2,4,5-trichlorophenol," *Appl. Clay Sci.*, vol. 90, pp. 81–87, Mar. 2014.
19. Tekmira, "Bentonite." [Online]. Available: <http://www.tekmira.esdm.go.id/data/Bentonit/ulasan.asp?xdir=Bentonit&commId=8&comm=Bentonit>. [Accessed: 10-

- Sep-2015].
20. H. Zamroni, "Lempung Berpilar Untuk Keselamatan Pengelolaan Limbah Radioaktif," in *Seminar Tahunan Pengawasan Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, 2003.
  21. S. V. S. Rao, A. G. S. Mani, S. Karua, M. Cheralathan, A. Reddy, S. K. Khandelwal, and B. Paul, "Treatment of liquid wastes using composite resins," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 307, no. 1, pp. 463–469, 2016.
  22. S. Ali Khan and M. Ali Khan, "Sorption of cesium on bentonite," *Waste Manag.*, vol. 14, no. 7, pp. 629–642, Jan. 1994.
  23. H. Tavakoli, H. Sepehrian, F. Semnani, and M. Samadfam, "Recovery of uranium from UCF liquid waste by anion exchange resin CG-400: Breakthrough curves, elution behavior and modeling studies," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 54, pp. 149–153, Apr. 2013.
  24. F. Semnani, Z. Asadi, M. Samadfam, and H. Sepehrian, "Uranium(VI) sorption behavior onto amberlite CG-400 anion exchange resin: Effects of pH, contact time, temperature and presence of phosphate," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 48, pp. 21–24, Oct. 2012.
  25. T. Y. Kim, S. S. An, W. G. Shim, J. W. Lee, S. Y. Cho, and J. H. Kim, "Adsorption and energetic heterogeneity properties of cesium ions on ion exchange resin," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 27, pp. 260–267, Jul. 2015.