

PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGUNAKAN KOLOM PENUKAR ION

Ajrieh Setyawan, Darmawan Aji, Sugeng Purnomo
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung 50
E-mail: ajrieh@batan.go.id

ABSTRAK

PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGGUNAKAN KOLOM PENUKAR ION. Pengolahan limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari pengoperasian Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy selama ini dilakukan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif menggunakan metode evaporasi. Pada saat ini evaporator telah beroperasi selama 3 dekade maka sudah mulai mengalami *aging*. Oleh karena itu diperlukan alternatif proses pengolahan limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy tersebut. Telah dilakukan kegiatan pengolahan limbah radioaktif cair alternatif menggunakan resin penukar ion. Kegiatan meliputi karakterisasi limbah menggunakan *multi channel analyzer* dan *atomic absorption spectroscopy*, percobaan pengolahan limbah skala laboratorium menggunakan metode *Jar Test* dan pengolahan limbah menggunakan tangki penukar ion. Hasil kegiatan karakterisasi limbah menunjukkan bahwa limbah radioaktif cair mengandung radionuklida Cs-137 sebesar $1,14 \times 10^{-5}$ Ci/m³, Co-60 sebesar 1×10^{-6} Ci/m³ dan mengandung kation Ca, Fe, Mg masing-masing dengan konsentrasi 4,531 mg/L, 2,079 mg/L, 10,880 mg/L. Pengolahan limbah radioaktif cair sebanyak 50 m³ dibutuhkan resin sebanyak 100 kg. Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan proses penukar ion dapat digunakan sebagai proses alternatif pendamping proses evaporasi dalam pengolahan limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy.
Kata kunci : Penukar Ion, MCA

ABSTRACT

LIQUID RADIOACTIVE WASTE TREATMENT USING COLUMN ION EXCHANGER. Processing liquid radioactive waste arising from the operation of the reactor Multipurpose G.A. Siwabessy had been done in the Center for Technology of Radioactive Waste using evaporation method. At this time the evaporator has been in operation for three decades it has begun to experience aging. Therefore we need an alternative processing to liquid radioactive waste arising from the operation of the reactor Multipurpose G.A. The Siwabessy. Has conducted activity liquid radioactive waste treatment alternative using ion exchange resins. Activities include waste characterization using Multi-Channel Analyzer and Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), waste processing laboratory scale experiments using methods Jar Test and sewage treatment using ion exchange tank. The results showed that the waste characterization activity liquid radioactive waste containing radionuclides Cs-137 for $1,14 \times 10^{-5}$ Ci / m³, Co-60 at 1×10^{-6} Ci / m³ and containing cations Ca, Fe, Mg, respectively with a concentration of 4.531 mg / L, 2.079 mg / L, 10.880 mg / L. Processing liquid radioactive waste as much as 50 m³ of resin needed as much as 100 kg. Liquid radioactive waste treatment using ion exchange process can be used as an alternative to co-evaporation process in the processing of liquid radioactive waste arising from the operation of the reactor Multipurpose G.A. Siwabessy.
Keywords : Ion Exchange, MCA

PENDAHULUAN

Limbah radioaktif cair ditimbulkan dari pengoperasian Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS). Limbah ini memerlukan pengolahan yang tepat agar tidak menimbulkan potensi bahaya radiologi bagi masyarakat dan lingkungan. Selama ini pengolahan limbah radioaktif tersebut dilakukan menggunakan proses evaporasi. Sampai dengan saat ini alat evaporator telah beroperasi selama beroperasi selama 3 dekade sehingga diperkirakan telah mengalami *aging*. Oleh karena itu dilakukan kegiatan pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan resin penukar ion sebagai proses alternatif pendamping evaporator yang telah mengalami *aging*.

Pengolahan limbah radioaktif dimaksudkan untuk mereduksi volume dan mengambil nuklida yang terkandung dalam limbah. Kegiatan pengolahan limbah radioaktif yang dilakukan antara lain percobaan pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan tangki yang berisi resin penukar ion. Resin penukar ion merupakan senyawa hidrokarbon terpolimerisasi yang mengandung ikatan silang (*crosslinking*) beserta gugusan-gugusan fungsional yang mempunyai ion-ion yang dapat dipertukarkan.

Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan evaporasi

Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan evaporator memerlukan energi yang besar karena memerlukan konsumsi solar yang cukup besar. Sebagai contoh konsumsi solar untuk boiler tiap jam sekitar 175 liter dengan kemampuan pengolahan proses evaporasi mencapai $0,75 \text{ m}^3/\text{jam}$. Untuk melakukan evaporasi 50 m^3 limbah radioaktif cair diperlukan waktu selama 67 jam, sehingga dibutuhkan solar sebanyak $175 \times 67 = 11725$ liter. Untuk solar industri (nonsubsidi) harga tiap liter solar sebesar Rp.11000 maka untuk mengolah 50 m^3 diperlukan biaya Rp.128.975.000. Setiap pengolahan 50 m^3 menghasilkan 1 m^3 konsentrat dengan pengolahan diperlukan sekitar 3 *shell* beton. [1]

Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan Resin Kation (*Ion Exchange*)

Reaksi pertukaran ion dapat terjadi karena adanya beda konsentrasi ion di dalam limbah dan resin yang dinamakan sebagai gaya dorong (*driving force*). Konsentrasi suatu unsur dalam limbah lebih besar daripada dalam resin, sehingga terjadi perpindahan unsur dari limbah ke resin dan dari resin akan dilepaskan ion yang dipertukarkan ke larutan limbah. Reaksi berlangsung terus sampai resin penukar ion jenuh. Dalam praktik, zeolit dan resin dapat dipakai sebagai penukar ion, akan tetapi resin memiliki kapasitas tukar kation yang lebih besar dari zeolit sehingga akan lebih optimal menggunakan resin dibandingkan zeolit.

Penggunaan kolom penukar ion dalam suatu instalasi nuklir sudah banyak digunakan, baik yang sifatnya sebagai pendukung, maupun sebagai fasilitas utama penyerapan ion radioaktif. Penggunaan resin dalam kolom penukar ion untuk pengolahan air pendingin primer, maupun air pendingin sekunder merupakan komponen yang sangat penting, karena umumnya unsur radioaktif dalam kedua pendingin tersebut dari bentuk ion. Demikian juga limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari instalasi nuklir perlu dilakukan pengelolaan agar selamat bagi manusia dan lingkungan.

Penggunaan penukar ion dimasukkan ke dalam paket kolom untuk mempermudah proses aliran cairan ke dalamnya. Kolom penukar ion yang digunakan bisa diisi oleh berbagai variasi ukuran dan material sesuai dengan syarat yang ditetapkan. Konfigurasi kolom dapat terdiri dari *bed* tunggal (kolom kation dengan anion terpisah) atau sistem campuran antara kation dengan anion menjadi satu. Operasi kolom dapat dilakukan secara proses kontinyu atau semi kontinyu. Proses pertukaran ion dalam kolom menyebabkan penukar ion akan mencapai jenuh karena jenuhnya unsur radioaktif dan unsur logam yang tertangkap. Dalam kaitannya prinsip pengolahan limbah radioaktif maka resin yang telah jenuh dilakukan penggantian agar fungsi pertukaran menjadi optimal kembali.

Unsur yang bersifat ion dalam air limbah dapat mengalami pertukaran dengan jenis resin tertentu. Proses demikian disebut sebagai penukar ion. Penukar ion (*ion exchange*) adalah proses penyerapan ion-ion oleh resin dengan cara ion-ion

dalam fasa cair diserap melalui ikatan kimiawi, karena bereaksi dengan padatan resin. Resin sendiri melepaskan ion lain sebagai ganti ion yang diserap. Selama operasi berlangsung, setiap ion akan dipertukarkan dengan ion penggantinya hingga seluruh resin jenuh dengan ion yang diserap. Resin penukar ion ialah suatu bahan padat yang memiliki bagian (ion positif atau negatif) tertentu yang bisa dilepas dan ditukar dengan bahan kimia lain dari luar. Di samping itu, resin penukar ion merupakan salah satu metode pemisahan menurut perubahan kimia. Ada dua (2) macam resin penukar ion yakni :

1. Resin penukar kation
2. Resin penukar anion

Pada resin penukar kation, kation yang terikat di resin akan digantikan oleh kation pada larutan yang dilewatkan dan sebaliknya. Pada kegiatan pengolahan limbah radioaktif proses penukaran ion umumnya dilakukan menggunakan resin penukar kation, karena komposisi dan nuklida yang terkandung dalam limbah sebagian besar memiliki ion positif seperti nuklida Cs-137 dan Co-60. Suatu resin penukar kation digolongkan sebagai polimer berbobot molekul tinggi yang terangkai silang mengandung gugus-gugus sulfonat, karboksilat, fenolat, dan sebagainya sebagai suatu bagian integral dari resin tersebut dengan jumlah kation yang ekuivalen. [1]

Secara prinsip, perlakuan proses penukar ion hampir sama dengan proses adsorpsi. Perbedaan hanya terletak pada jenis medianya yang dapat berupa resin atau karbon aktif. Alat penukar ion yang digunakan berupa alat penukar ion kolom tunggal. Kegiatan pengolahan limbah radioaktif cair yang dilakukan adalah menggunakan resin penukar kation yang dimasukkan ke dalam tangki PVC dengan kapasitas 500 liter. Melalui modifikasi sederhana, dimana resin terlebih dahulu dimasukan ke dalam kantong bahan kain katun kemudian dimasukkan dalam toren. Hal ini dilakukan dengan maksud untuk mencegah terjadinya kebocoran resin dan terikut bersama limbah radioaktif cair yang dilewatkan. Selain itu juga untuk mempermudah *loading* dan *unloading* resin dalam toren.

Karakterisasi radionuklida dalam limbah sebelum dan setelah melewati resin penukar ion dilakukan menggunakan MCA. Selain itu dilakukan juga analisis kandungan kation lainnya yang terkandung dalam limbah.

METODOLOGI

Bahan

Bahan yang digunakan : Limbah radioaktif cair PRSG dan resin kation jenis Lewatit monoplus S108

Peralatan

Peralatan yang digunakan kegiatan ini pH meter, konduktometer, peralatan analisis radionuklida (MCA), peralatan *Jar Test*, tangki limbah, tangka toren dan lainnya.

Metode

1. Pengambilan Sampel

Sampel limbah radioaktif cair diambil dengan menggunakan botol sampel sebanyak 500 ml untuk keperluan karakterisasi limbah radioaktif cair,

2. Pengukuran pH
Untuk mengukur keasaman (pH) pada sampel limbah di gunakan pH meter elektrik dan kertas pH universal. Sampel limbah yang akan diukur diambil dan dituang ke dalam gelas ukur untuk mempermudah pengukurannya,
3. Pengukuran Konduktivitas Limbah
Konduktivitas menyatakan kemampuan larutan untuk menghantar listrik, dimana daya tersebut sebanding dengan kadar zat terlarut yang mengion dalam larutan. Langkah-langkah dalam pengukuran konduktivitas sampel adalah kalibrasi alat dengan larutan KCL 0,1 M dan mengukur konduktivitas sampel limbah
4. Analisis Radionuklida menggunakan MCA
Kandungan radionuklida dalam limbah dilakukan dengan menggunakan MCA. Prinsip pengukuran kandungan radionuklida dengan spektrometer gamma adalah bahan yang mengandung zat radioaktif pemancar gamma akan memancarkan sinar gamma. Sinar gamma tersebut akan berinteraksi dengan detektor HPGE sehingga menimbulkan pulsa arus listrik. Pulsa ini akan diperkuat oleh *preamplifier* dan *amplifier*. Keluarnya akan diubah menjadi spektum-spektrum oleh alat ADC (*Analog Digital Converter*) pada pembacaan (layar komputer). Puncak-puncak spektrum tersebut akan menunjukkan spesifikasi radionuklida beserta aktivitasnya,
5. Pengolahan limbah skala laboratorium menggunakan metode *jar test*
Jar test adalah suatu percobaan skala laboratorium untuk menentukan kondisi operasi optimum pada proses pengolahan air dan air limbah. Metode ini dapat menentukan nilai pH, variasi dalam penambahan dosis koagulan, resin, polimer, kecepatan putar, variasi jenis koagulan atau jenis polimer lainnya. Pada skala laboratorium untuk memprediksi kebutuhan pengolahan air yang sebenarnya, Metode *jar test* pada pengolahan limbah radioaktif cair dengan resin mensimulasikan proses pertukaran kation dalam limbah dengan kation dalam resin menggunakan sistem *single batch reactor*.

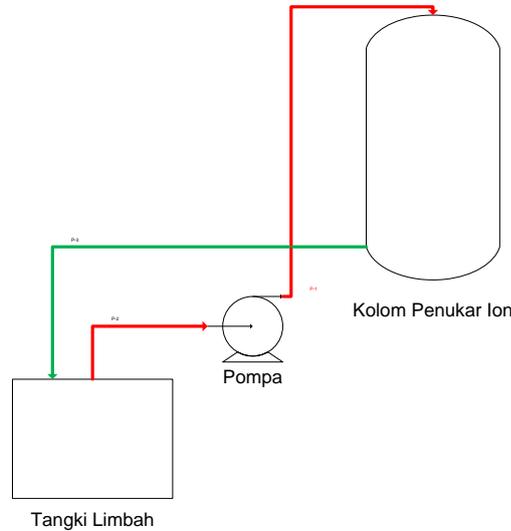


Gambar 1. Pengolahan penukar ion menggunakan metode *jar test*

Banyaknya resin yang digunakan adalah 1 gram, sedangkan jumlah sampel limbah radioaktif cair yang dilewatkan sebanyak 500 mL dengan waktu kontak yang berbeda. Tiap periode waktu kontak dianalisis menggunakan MCA untuk mengetahui seberapa besar penurunan aktivitas radionuklida yang terkandung

dalam limbah sekaligus melihat kemampuan resin kation dalam menukarkan ionnya dengan ion kation pada sampel.

6. Pengolahan limbah menggunakan tangki penukar ion



Gambar 2. Proses Pertukaran Ion

Metoda yang digunakan yaitu dengan melewati limbah radioaktif cair kedalam kolom resin menggunakan pompa umpan dan berlangsung secara kontinyu hingga kation radionuklida dalam limbah tertukar menyeluruh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi limbah radioaktif cair menggunakan MCA ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakterisasi limbah radioaktif cair

| No | Karakterisasi | Konsentrasi | Konversi |
|----|---------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Ca | 4,531 mg/L | 0,42 meq/L |
| 2 | Fe | 2,079 mg/L | 0,17 meq/L |
| 3 | Mg | 10,880 mg/L | 0,54 meq/L |
| 4 | Cs-137 | $1,14 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$ | $1,14 \times 10^{-5} \text{Ci/m}^3$ |
| 5 | C0-60 | $1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/ml}$ | $1 \times 10^{-6} \text{Ci/m}^3$ |

Uji coba pengolahan sampel limbah diambil dari tangki penyimpanan R2201C. Limbah radioaktif cair yang akan dilakukan proses pengolahan menggunakan penukar ion harus dianalisis karakteristiknya sebelum dilakukan pengolahan. Analisis ini penting untuk mengetahui kondisi limbah dan untuk menghindari kemungkinan adanya bahan-bahan berbahaya yang terdapat dalam limbah mentah, selain itu juga sebagai tahap untuk menjamin keberhasilan proses pengolahan.

Dari hasil karakterisasi limbah dapat diperhitungkan berapa banyak jumlah resin yang digunakan untuk dapat terjadinya pertukaran ion antara radionuklida yang terkandung dalam limbah dengan resin seperti berikut ini.

Waktu Operasi

$$\begin{aligned} \text{Laju operasi kolom} &= 2,04 \text{ gpm/ft}^2 \\ &= 2,04 \text{ gpm}/929,0304 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A = 368,15 \text{ cm}^2 &= \frac{368,15 \text{ cm}^2}{929,0304 \text{ cm}^2} \times 2,04 \text{ gpm} \\ &= 0,808 \text{ gpm} \\ &= 3,6764 \text{ L/min} \end{aligned}$$

Mengolah 1 tangki 50 m³

$$t = \frac{50.000 \text{ L}}{3,6764 \text{ L/min}}$$

$$= 13600,26 \text{ menit}$$

$$= 226,67 \text{ jam} = 10 \text{ hari}$$

Kapasitas tukar kation lewatit

1,6 meq/g

Untuk 50 m³ efisiensi 80%

$$\text{Kebutuhan resin} = \frac{50.000 \text{ L} \times 0,95 \text{ meq/L}}{0,8 \times 1,6 \text{ meq/g}}$$

$$\text{Density } 1,26 \text{ g/ml} = \frac{37.109,37 \text{ gr}}{1,26 \text{ gr/ml}}$$

$$= 29451,88 \text{ ml} = 30 \text{ L}$$

Tinggi bed minimum 800 mm

$$A = \frac{29.451,88 \text{ cm}^2}{80 \text{ cm}} = 368,15 \text{ cm}^2$$

$$\text{Diameter kolom } D = \sqrt{\frac{4 \times 368,15 \text{ cm}^2}{3,14}}$$

$$= 21,66 \text{ cm}$$

Hasil percobaan pengolahan limbah menggunakan metode *jar test* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengolahan penukar ion menggunakan jar test

| Waktu (Jam) | Aktivitas Cs-137 (Ci/M ³) | pH | Konduktivitas (µs/cm) |
|-------------|---------------------------------------|------|-----------------------|
| 0 | 1,14 x10 ⁻⁵ | 7,15 | 952 |
| 6 | 1,6 x10 ⁻⁶ | 7,04 | 978 |
| 8 | 1,4 x10 ⁻⁶ | 6,37 | 989 |
| 12 | ttd | 5,44 | 993 |

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa waktu penurunan aktivitas radionuklida tiap periode sangat sedikit, hal ini disebabkan bahwa prinsip pengolahan menggunakan *jar test* dimana kontak nuklida terhadap resin tidak sebaik kontak nuklida jika melewati kolom pertukaran ion. Pada periode waktu 12 jam nuklida tertangkap semua yang ditandai sudah tidak adanya hasil bacaan radionuklida menggunakan MCA dengan kata lain sebanyak 1 gr resin kation dapat menangkap radionuklida pada 500 ml limbah radioaktif cair untuk waktu kontak 12 jam atau setara dengan 100 kg resin untuk 50 m³ limbah radioaktif cair.

Dari hasil percobaan metode *jar test* skala laboratorium selanjutnya dilakukan penerapan pengolahan limbah radioaktif dengan hasil seperti ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisis radionuklida proses Penukar Ion

| No | Waktu (Jam) | Nuklida Cs-137 (Ci/M ³) | pH | Konduktivitas (µs/cm) | Keterangan |
|----|-------------|-------------------------------------|------|-----------------------|---|
| 1 | 0 | 1,1 x10 ⁻⁵ | 7,89 | 995 | Resin awal 3 sak (20kg) |
| 2 | 20 | 6,2 x10 ⁻⁶ | 6,43 | 1025 | |
| 3 | 30 | 4,8 x10 ⁻⁶ | 5,00 | 1132 | Netralisasi |
| 4 | 60 | 3,6 x10 ⁻⁶ | 5,88 | 1243 | Pergantian resin sebanyak 2 sak (20 kg) |
| 5 | 72 | 2,6 x10 ⁻⁶ | 4,35 | 1265 | |
| 6 | 92 | 1,8 x10 ⁻⁶ | 6,55 | 1299 | Netralisasi |
| 7 | 102 | 1,4 x10 ⁻⁶ | 4,34 | 1307 | |
| 8 | 145 | ttd | 7,7 | 1324 | Netralisasi |

Dari Tabel 3. dapat diketahui bahwa periode waktu kontak penukaran berpengaruh pada penurunan radionuklida. Kondisi pH limbah mengalami penurunan (limbah cair bersifat asam) karena kation dan nuklida dalam air akan bertukar dengan ion H⁺ dari resin penukar kation, sehingga untuk menjaga optimalisasi proses pertukaran maka dilakukan penetralan menggunakan NaOH untuk mengembalikan pH menjadi netral. Konduktivitas limbah mengalami kenaikan periode waktu pertukaran, hal ini berkaitan dengan kapasitas tukar ion dari resin kation. Kapasitas tukar ion adalah bilangan yang menyatakan jumlah banyaknya ion yang dapat dipertukarkan dalam 1 gr resin. Semakin lama waktu tukar resin maka semakin berkurang kemampuan tukar resin terhadap ion-ion pengotor dalam limbah, sehingga untuk mengembalikan fungsi tukar resin dilakukan penggantian resin.

Dari hasil percobaan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk dapat mengolah limbah radioaktif cair sebanyak 50 m³ dengan karakteristik seperti Tabel 3 dibutuhkan resin kation sebanyak 100 kg resin.

Berikut dilakukan perbandingan pengolahan pengolahan limbah cair yang berasal RSG dengan metode evaporasi dan penukar ion seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan pengolahan Limbah Cair PRSG dengan penukar ion dan evaporasi

| Biaya Operasi | |
|--------------------------------|--|
| Evaporasi | Penukar Ion |
| Rp. 128.975.000 rupiah (Solar) | Rp. 4.000.000 (100 kg resin, 25 Kg @ 1 Juta) |

Tabel 4. Perbandingan pengolahan Limbah Cair PRSG dengan penukar ion dan evaporasi (lanjutan)

| Operasional Proses | |
|---|--------------------------|
| Evaporasi | Penukar Ion |
| Rumit proses, membutuhkan banyak operator (boiler, layanan air, air demin, pendingin air dan penguapan) | Sederhana (Umpan proses) |
| Aspek keselamatan | |
| Evaporasi | Penukar Ion |
| Memiliki potensi ledakan tekanan uap dan ketel penguapan serta potensi kontaminasi dari kebocoran | Kontaminasi tumpahan |

Dari Tabel 4 nampak bahwa pengolahan limbah menggunakan proses penukar ion memiliki kelebihan dibandingkan proses evaporasi dari segi biaya operasi, operasi proses dan aspek keselamatan. Sehingga proses penukar ion dapat digunakan sebagai alternatif untuk proses pengolahan limbah radioaktif cair pendamping proses evaporasi.

KESIMPULAN

1. Karakterisasi limbah radioaktif cair merupakan hal penting untuk menjamin keberhasilan proses pengolahan limbah menggunakan resin penukar ion
2. Uji coba skala laboratorium menggunakan sistem *jartest* dibutuhkan resin sebanyak 1 gr resin untuk 500 ml limbah cair atau setara dengan 100 kg untuk 50 m³ limbah cair
3. Proses pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan penukar ion dibutuhkan 90-100 kg resin untuk 50 m³ limbah radioaktif cair
4. Proses penukar ion dapat menjadi solusi alternatif pengolahan limbah radioaktif cair sebagai pendamping proses evaporasi

DAFTAR PUSTAKA

1. Zamroni, H., dkk. 2015, "Kaji Ekonomi Pengolahan Limbah Radioaktif Cair PRSG", PTLR, BATAN
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY ,2002. Application of Ion Exchange Process For The Treatment Of Radioactive Waste and Management of Spent Ion Exchange, IAEA, Vienna, Austria
3. Gokhle, AS., Mathor, PK., and Venkateswarhu, KS., 1987. Resin for Water Purification; Properties and Characteristion", Water chemistry Division, Bhabha Atomic. Research Centre. Bombay, India
4. Drofner, K., Hartono, AJ., 1995. Iptek Penukar Ion, Andi Offset , Edisi I, Yogyakarta.

5. Erlina, D., 2007. Karakterisasi kinerja resin penukar ion pada sistem air bebas mineral, Seminar nasional STTN , Yogyakarta hal 95-104
6. Skoog, 2000. *Analytical Chemistry*. Thomson Learning Inc: An Introduction.