

✓ 1080 00 223

PPGM-L 170-78

MEMPELAJARI KEEFFEKTIPAN FeSO_4
SEBAGAI PENGEMBAN UNTUK MEMISAHKAN Sr^{90}
DARI SAMPAH STRONTIUM CAIR

Djoko Sardjono



BADAN TENAGA ATOM NASIONAL
PUSAT PENELITIAN TENAGA ATOM GAMA
YOGYAKARTA — INDONESIA

We regret that some of the pages in the microfiche copy of this report may not be up to the proper legibility standards, even though the best possible copy was used for preparing the master fiche.

Teknik dan Teknologi
Pengolahan Sampah Radioaktif
Perlakuan Sampah Radioaktif

PPGM - L 170 - 78

MEMPELAJARI KEEFFEKTIPAN FeSO_4
SEBAGAI PENGEMBAN UNTUK MEMISAHKAN Sr^{90}
DARI SAMPAH STRONTIUM CAIR

Djoko Sardjono

1978

BADAN TENAGA ATOM NASIONAL
Pusat Penelitian Tenaga Atom Gama
Jl. Babarsari Kotakpos 8 Telpon 3661
YOGYAKARTA - INDONESIA

ABSTRAK

Dipelajari keefektipan FeSO_4 sebagai pengemban untuk memisahkan Sr^{90} dalam sampah strontium cair. Penelitian ini dikaitkan dengan suatu studi mengenai kemampuan FeSO_4 sebagai suatu pengemban untuk memisahkan Sr^{90} dari sampah strontium cair. Methoda yang digunakan dalam percobaan ini merupakan suatu terapan methoda kopresipitasi untuk mereduksi aktivitas sampah strontium cair sampai aktivitas tertentu yang cukup aman untuk dibuang ke lingkungan.

ABSTRACT

The effectiveness of FeSO_4 as a carrier for removing Sr^{90} from the strontium liquid waste is studied. This research is concerned with the study of the capacity of FeSO_4 as a carrier for removing Sr^{90} from the strontium liquid waste. The method being used in the experiment is an application of the coprecipitation method to reduce the activity of the strontium liquid waste to a certain activity that is safe enough to be discharged in the environment.

D A F T A R I S I

A B S T R A K	ii
I. PENDAHULUAN	1
II. TUJUAN DARI PENELITIAN	3
III. PERTIMBANGAN TEORITIS MENGENAI KOPRESIPITASI	4
3.1. Mekanisme kopresipitasi secara adsorpsi	4
3.2. Mekanisme kopresipitasi secara oklusi	6
IV. PROSEDUR PERCOBAAN	8
V. ALAT-ALAT DAN BAHAN-BAHAN OBAT-OBATAN	9
VI. HASIL PERCOBAAN	11
VII. PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN	16
D A F T A R P U S T A K A	18

I. PENDAHULUAN

Penelitian ini merupakan realisasi suatu metode pengembunan atau yang lazim disebut kopresipitasi untuk menisahkan radionuklida strontium radioaktif yang merupakan salah satu hasil fisi pada radiasi nuklir dalam reaktor.

Proses ini perlu dilakukan berhubung kandungan (konsentrasi) dari radionuklida Sr^{90} dalam sampah cair cukup kecil sehingga jika dipisahkan secara pengendapan biasa dengan suasana alkalis yang memungkinkan terjadinya proses pengendapan tidak bisa dilakukan oleh karena hasil kali kelarutan (K_s) tidak terlempai. Sedangkan kalau ditinjau secara radiometri konsentrasi yang cukup kecil tersebut dalam besaran aktivitas persatuan volume mikro Curie/cc. cukup mempunyai potensi bahaya karena melebihi harga batas maksimum yang diperbolehkan untuk dibuang ke lingkungan. Menurut ketentuan *International Commission on Radiological Protection (I.C.R.P.)* harga batas (MPC) harus tidak melebihi dari 10^{-6} mikro Curie/cc. Adapun sifat yang membahayakan terhadap kelestarian lingkungan tersebut ialah disebabkan radiotoksitasnya atau radioaktivitasnya dan umur paruhnya yang panjang : 25 tahun. Sehingga perlu diolah sebelum dibuang. Hal-hal yang khusus sebagai dasar peninjauan dari pemakaian FeSO_4 sebagai pengembun ialah dengan pertimbangan beberapa faktor sebagai berikut :

1. Hasil kali kelarutan dari endapan yang mungkin terbentuk pada pengendapan-pengendapan kation-kation yang terdapat dalam sampah strontium cair yang diolah. Dengan membuat suasana sampah cair menjadi

alkalis dengan menambahkan larutan NaOH maka kation-kation yang mungkin terendapkan : $\text{Fe}(\text{OH})_2$: (harga Ks : 2×10^{-15}) ; $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Ks : $1,4 \times 10^{-38}$) $\text{Sr}(\text{OH})_2$ (Ks : $3,2 \times 10^{-4}$) ; $\text{Sr}(\text{SO}_4)$ (Ks : $2,8 \times 10^{-7}$).

2. Sifat mudah teroksidasi (oksidativ) dari ion Ferro menjadi Ferri (Fe^{++} menjadi Fe^{+++}) pada temperatur biasa (kamar) oleh Oksigen dari udara yang dapat mempengaruhi oksidasi tersebut, sehingga dapat diharapkan endapan yang terjadi pada kondisi alkalis ialah: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ berwarna coklat dengan hasil kali kelarutan relatif terkecil (Ks : $1,4 \times 10^{-38}$) jadi mudah terlampaui.
3. Berdasarkan teori Hahn : yang menyatakan bahwa endapan yang mempunyai hasil kali kelarutan (Ks) makin kecil mempunyai potensi adsorpsi terhadap ion-ion asing yang berada di sekelilingnya terbesar. Dari sifat ini dapat kita manfaatkan di dalam metode kopersipitasi karena sifat ini merupakan salah satu mekanisme kopersipitasi.

II. TUJUAN DARI PENELITIAN

Tujuan dari penelitian yang kami lakukan ini ialah untuk menyelidiki seberapa jauh kemampuan dari bahan pengemban (FeSO_4) untuk memisahkan Sr^{90} dalam sampah strontium cair dengan cara mengikut sertakan secara kopresipitasi pada proses pengendapan ion-ion Ferro/Ferri sebagai endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ / $\text{Fe}(\text{OH})_3$ secara kuantitatif. Sebagai cara pendekatan dari tujuan tersebut di atas maka diselidiki variabel-variabel yang mungkin sekali mempengaruhi pada proses pengendapan maupun kekekalan endapan, di luar variabel temperatur dan tekanan. Adapun variabel-variabel yang kami tinjau ialah ; pengaruh penambahan alkali (NaOH) atau kondisi pH dari sampah Sr^{90} cair kemudian waktu tinggal (waktu enap) endapan dalam larutan sebagai bahan pengemban dan pengaruh besarnya konsentrasi bahan pengemban juga waktu pengadukan terhadap efisiensi pemisahan.

Efisiensi pemisahan dinyatakan dalam % dari $(A_i - A_f) / A_i \times 100$ % per 1 satuan volume 1 cc. (A_i = aktivitas awal sebelum diolah; A_f = aktivitas akhir setelah diolah).

III. PERTIMBANGAN TEORITIS MENGENAI KOPRESIPITASI

Masalah pemisahan radioisotop-radioisotop dengan cara kopresipitasi secara esensial sangat erat hubungannya dengan phenomena kopresipitasi yang telah diobservasi oleh para ahli kimia analisa.

Adapun fenomenanya ialah jika endapan-endapan memisahkan diri dari dalam larutan biasanya selalu mengandung berbagai-bagai ion-ion asing sebagai pengotor.

Kontaminasi suatu endapan oleh ion-ion asing yang biasanya dapat larut pada kondisi pengendapan ini disebut "KOPRESIPITASI". Para ahli kimia mengemukakan 2 mekanisme pokok yang menyokong phenomena kopresipitasi yakni : adsorpsi dan oklusi.

III. 1. Mekanisme adsorpsi : Adsorpsi ion-ion asing pada permukaan dari partikel-partikel endapan selama proses pengendapan berlangsung.

Dengan cara adsorpsi kemampuan ion-ion permukaan dari partikel-partikel endapan untuk mengadsorpsi ion-ion yang bermuatan berlawanan dari dalam larutan. Kecenderungan partikel-partikel tersebut untuk mengadsorpsi terlebih dahulu satu ion tersebut dari dalam larutan dengan konsentrasi yang cukup.

Bila satu ion kisi kristal tidak terdapat dalam larutan, maka permukaan partikel endapan akan mengadsorpsi ion-ion asing pada kisi kristal. Ion asing yang ada diantara ion-ion yang terdapat dalam larutan dengan cara adsorpsi oleh garam yang mempunyai harga kelarutan

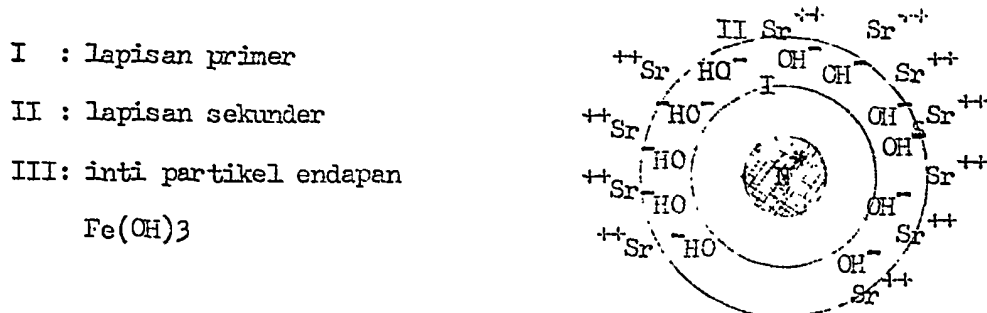
kecil akan membentuk ion kisi dengan muatan berlawanan.

Dengan naiknya kelarutan dari ion-ion asing tersebut dapat juga terjadi adsorpsi terhadap ion asing pada kisi garam sesuai dengan kaidah : "*Paneth Fayans-Hahn*". Ion-ion asing teradsorpsi akan membentuk lapisan primer di sekeliling partikel endapan. Biasanya ion-ion teradsorpsi ini berfungsi untuk memantapkan lapisan sekunder. Pada pembentukan lapisan primer dan sekunder keadaan spesifik yang memungkinkan terkontaminasinya endapan tersebut oleh ion asing secara kopresipitasi adsorpsi.

Sebagai contoh dalam proses pengendapan dari larutan kation pada larutan anion maka partikel-partikel endapan mula-mula akan mengadsorpsi anion sehingga lapisan primer tersebut bermuatan negatif. Dan ion-ion asing yang terdapat dalam larutan sebagai counter ion menempati lapisan sekunder, tetapi jika terjadi sebaliknya yakni bila larutan ditambahkan pada larutan kation lapisan sekunder akan ditempati oleh anion-anion asing.

Misalnya pada peristiwa pengendapan As_2S_3 dengan cara melewatkan gas H_2S ke dalam larutan asam arsenious trikloride ($AsCl_3$), maka ion-ion sulfide ($S^{=}$) akan teradsorpsi pada permukaan partikel $AsCl_3$ dan lapisan sekunder ditempati oleh ion H_3O^+ . Dan sebaliknya jika As_2S_3 merupakan hasil pengendapan dari gas H_2S yang dilewatkan ke dalam larutan basa yang mengandung $AsCl_3$ dan $ZnCl_2$ dengan kondisi di mana dimungkinkan terjadinya pengendapan ZnS ion-ion Sulfide ($S^{=}$) akan menempati lapisan primer dan ion-ion Zn (muatan positif 2) membentuk bulk dari lapisan sekunder.

Dari mekanisme kopresipitasi secara adsorpsi dapat digambarkan mekanisme yang mungkin terjadi dari radio strontium dengan menggunakan pengompolan FeSO_4 seperti berikut.



Dalam hal ini FeSO_4 dianggap sebagai larutan kation dan larutan NaOH sebagai larutan anion, partikel endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan ion OH^- akan menempati lapisan primer sehingga muatannya negatif. Sedangkan ion asing (Sr^{++}) sebagai ion yang berlawanan (counter ion) menempati lapisan sekunder.

III. 2. Mekanisme-mekanisme : kopresipitasi secara oklusi.

Mekanisme ini dapat terjadi jika partikel primer dari endapan ukurannya bertambah besar dan ion asing masuk dalam kisi kristal dari endapan. Hal ini dapat terjadi jika larutan mengandung ion asing yang dapat mensubstitusi kisi kristal anion-anion atau kation-kation dari endapan.

Substitusi ini terjadi bila ion-ion asing tersebut mempunyai ukuran dan muatan yang sama dengan muatan dan ukuran dari ion-ion endapan yang disubstitusi, tetapi dapat juga terjadi dengan ion-ion yang muatannya serupa tapi muatannya berbeda asal formula kimianya serupa (similar) misalnya : BaSO_4 dan PbSO_4 ; BaSO_4 dan BaCrO_4 merupakan contoh untuk anion dan kation yang mempunyai ukuran dan muatan yang sama. Sedangkan untuk keadaan dua misalnya : BaSO_4 dan KMnO_4 mempunyai

ukuran maupun muatan yang berbeda, baik anion ataupun kationnya, Kristal-kristal endapan yang terbentuk pada kondisi di mana terjadi substitusi disebut kristal campuran (*mixed crystals*) atau kristal larutan padat (*solid-solution crystals*). Ion-ion asing yang tidak masuk dalam kisi kristal dari endapan biasanya teradsorpsi pada permukaan partikel endapan primer selama pertumbuhan kristal. Karena ion-ion tersebut tidak masuk dalam kisi kristal endapan maka tidak mungkin terjadi substitusi terhadap anion-anion maupun kation-kation dari endapan. Oklusi akan berakibat pembentukan struktur kristal endapan yang tidak sempurna.

Perlu diketahui bahwa oklusi biasanya terjadi pada endapan-endapan yang berbentuk kristalin di mana kecepatan agregasi berorientasi untuk mempromosikan pertumbuhan kristal sehingga ukuran kristal menjadi bertambah besar."

Untuk endapan-endapan yang berbentuk gelatin atau amorph berkecenderungan tetap dalam bentuk kristal-kristal agglomerasi sangat kecil akibatnya pada pertumbuhan kristal tidak memungkinkan terjadi oklusi dengan ion-ion asing. Dengan demikian oklusi ion-ion asing pada endapan-endapan yang berbentuk gelatin. Menurut teori Von Weinman : bahwa endapan hidroksida dari logam diantaranya Fe dan Cu adalah berbentuk gelatin, sedangkan teori Hahn : mengatakan bahwa endapan yang berbentuk gelatin dan mempunyai harga K_s yang relatif kecil mempunyai sifat adsorptiv yang cukup besar.

IV. PROSEDUR PENCOBAN

1. Ambil sejumlah larutan Sr^{90} dari Fisika Kesehatan yang diperlakukan sebagai sampah strontium cair dengan volume tertentu sebanyak 50cc. masukkan dalam beker glas 500 cc. yang telah dilengkapi dengan pengaduk listrik dan buret berisi larutan NaOH 0,1 N. Dalam penelitian ini larutan (Sr) setelah pengenceran.
2. Lakukan test pH dari larutan Sr^{90} sebelum diolah dengan kertas pH Universal indicator yang memberikan perubahan warna sesuai dengan daerah pH di sekitar 3-4.
3. Untuk memberikan suasana pH yang sesuai untuk pengendapan ion Fe sebagai hidroksida, larutan NaOH kita tambahkan sampai terlihat adanya endapan dan kita periksa harga pH pada saat itu. Hal ini kita lakukan setelah larutan pengomatan FeSO_4 kita tambahkan dalam larutan Sr, dan diaduk dalam waktu tertentu.
4. Lakukan variasi terhadap kondisi pH dari larutan dengan penambahan larutan NaOH , kemudian beningan kita analisa untuk mengetahui efisiensi pemisahan pada bermacam-macam kondisi pH.
5. Lakukan juga variasi penambahan konsentrasi pengomatan terhadap efisiensi pemisahan, kemudian variasi waktu pengadukan, variasi waktu enap (*settling time*).

V. ALAT-ALAT DAN BAHAN-BAHAN OBAT-OBATAN UNTUK PERCOBAAN

Alat-alat yang dipergunakan dalam penelitian ini meliputi alat-alat untuk percobaan secara batch dan alat untuk menganalisa aktivitas cuplikan sebelum dan sesudah diolah dengan bahan pengemban.

Alat-alat percobaan :

1. Beker glass ukuran volume 500 cc. yang dilengkapi dengan pengaduk listrik.
2. Buret diisi dengan larutan NaOH 0,1 N untuk mengatur kondisi pH dari sampah cair strontium.
3. Pipet pindah untuk mengambil contoh (*sample*) dari wadah (*container*) dengan ukuran volume : 25 cc.
4. Labu takar ukuran volume : 50 cc. dan 100 cc.
5. Pipet mikro ukuran volume 0,1 cc. untuk mengambil contoh (cuplikan) dari contoh (*sample*) yang belum diolah maupun yang sudah dan akan dianalisa.
6. Alat pemanas untuk mengeringkan cuplikan digunakan lampu Infra merah.
7. Flanset dari aluminium untuk tempat cuplikan.

Bahan reagen :

1. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ buatan Merek sebagai bahan pengemban.
2. NaOH buatan Merek sebagai bahan pengatur pH larutan.
3. Larutan sampah cair Strontium dari Fisika Kesehatan, sebagai sampah cair yang akan diolah dengan aktivigas awal : sekitar 3×10^{-4} mikro kurie. per 1 cc.

Alat analisa :

Analisa dilakukan dengan metode analisa secara radiometri dengan menggunakan alat pencacah Geiger Muller Tingkap ujung buatan Nuclear Chicago Mode 10C lengkap dengan alat-alat :

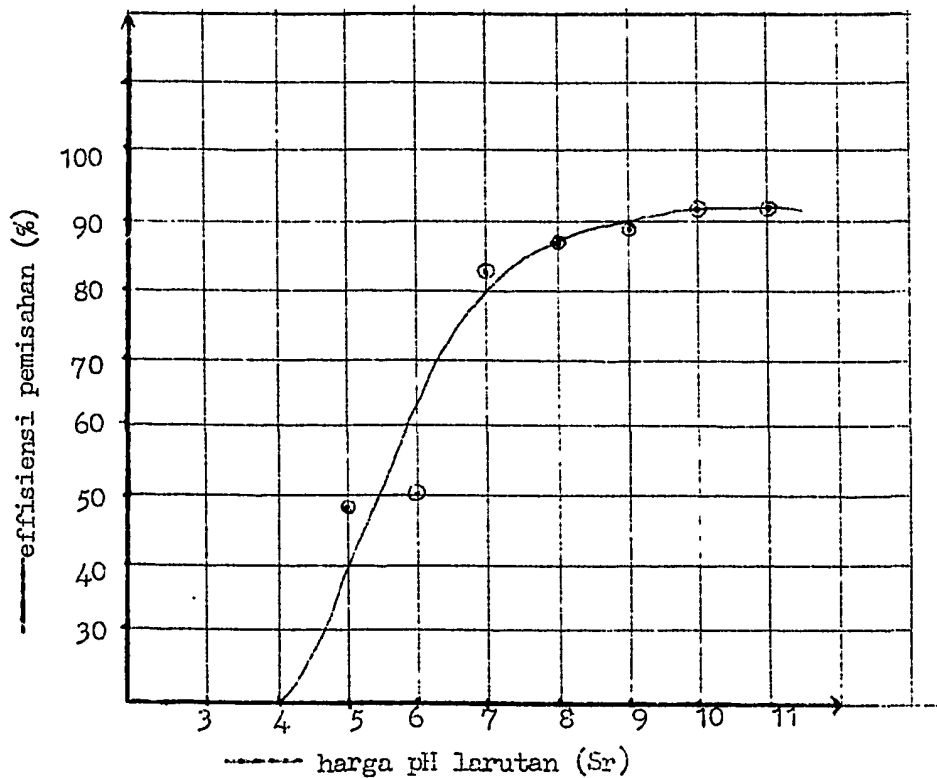
pencatat (*recorder*) scaler Model 133 B

porisai timbal buatan Technical Associates Burbank California Model 256 seri 1248.

VI. HASIL PERCOBAAN

Dengan menganalisa aktivitas dari beningan setelah diolah pada berbagai variabel yang ditinjau didapatkan hasil-hasil sebagai berikut:

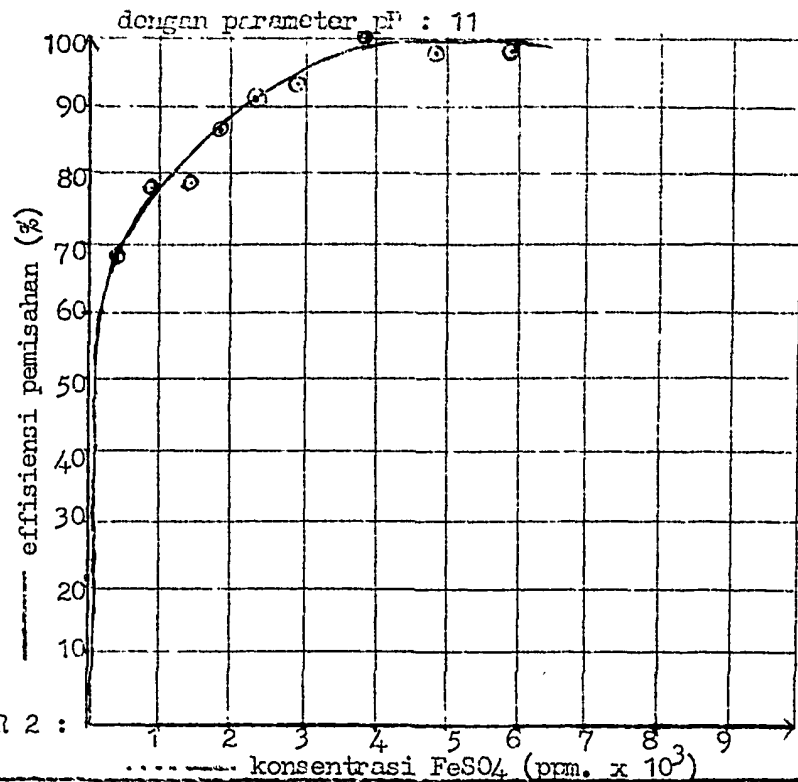
GAMBAR 1: Grafik pengaruh kondisi pH larutan Sr^{90} terhadap efisiensi pemisahan.



TABEL GAMBAR 1: dengan pH larutan awal (sebelum ditambah NaOH): 3 - 4.

pH larutan :	5	6	7	8	9	10	11
cpm/cc :	60	50	20	16	13	10	10
Eff. Pemisahan (%) :	48,4	50,9	82,8	86,2	88,8	91,4	91,4

VI. 2. GAMBAR 2. : pengaruh penambahan konsentrasi
pengemban (FeSO_4) terhadap efisiensi
pemisahan (Eff. pemisahan : %)

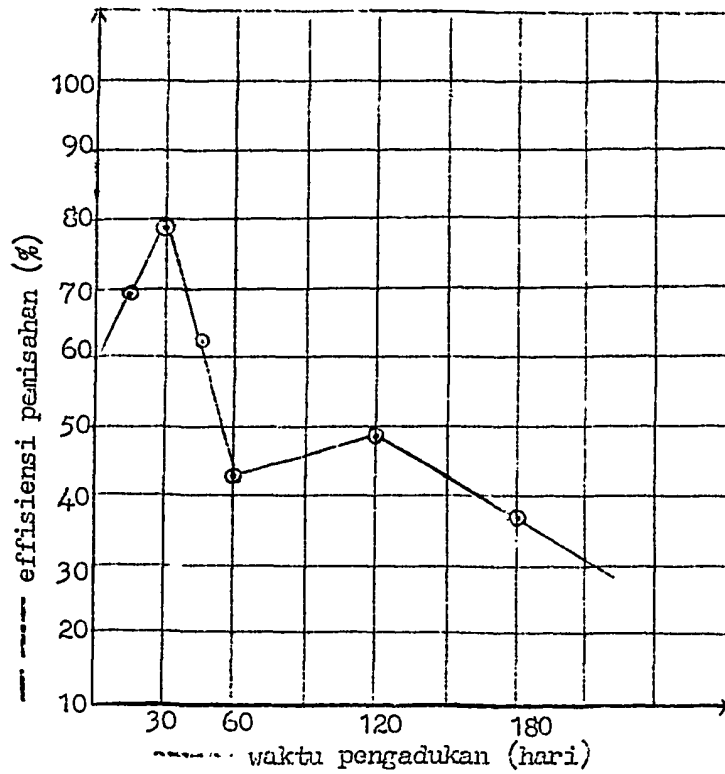


TABEL GAMBAR 2 :

Konsentrasi FeSO_4 : ($\text{ppm} \times 1000$)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
cpm/cc	: 37	29	26	17	11	10	2	4	3
Eff. pemisahan (%) :	68,0	75,3	77,9	85,4	90,5	91,4	98,3	96,6	96,7

VI. 3. GAMBAR 3 : grafik waktu pengadukan versus efisiensi pemisahan.

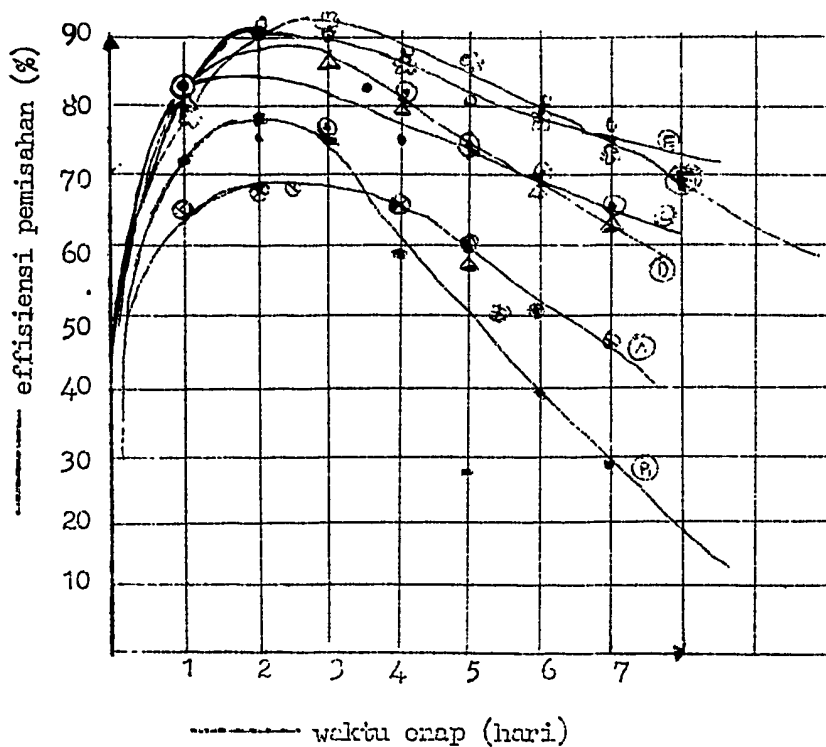
Dengan parameter $pli : 11$



TABEL GAMBAR 3 :

waktu pengadukan (menit) :	15	30	45	60	120	180
cacah per menit/cc :	35	24	44	66	59	73
Eff. pemisahan (%) :	69,9	79,3	62,1	43,2	49,2	37,2

VI. 4. GAMBAR 4 : pengaruh waktu tinggal endapan dalam larutan (waktu enap) terhadap efisiensi pemisahan, dengan berbagai konsentrasi pengemban dengan kode masing-masing : A = 500 ppm ; B = 1000 ppm ; C = 1500 ppm ; D = 2000 ppm ; E = 2500 ppm ; f = 3000 ppm.



waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
cacah per menit/cc	: 39	38	37	39	47	57
effisiensi pemisahan (%)	: 66,5	67,3	68,0	66,5	59,0	50,6

TABEL GAMBAR 4 : Untuk konsentrasi $\text{FeSO}_4 = 1000 \text{ ppm}$ (0,1 gr/100 cc)

Waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
Cacah per menit/cc	: 32	25	29	48	83	70
Effisiensi pemisahan (%)	: 72,4	78,5	75,3	59,2	28,6	39,8

TABEL GAMBAR 4 : Konsentrasi $\text{FeSO}_4 = 1500 \text{ ppm}$ (0,15 gr/100 cc)

Waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
Cacah per menit/cc	: 18	28	26	20	29	33
Effisiensi pemisahan (%)	: 84,7	75,9	77,9	82,8	74,5	71,6

TABEL GAMBAR 4 : Konsentrasi $\text{FeSO}_4 = 2000 \text{ ppm}$ (0,20 gr/100 cc)

Waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
Cacah per menit/cc	: 20	15	17	23	50	36
Effisiensi pemisahan (%)	: 82,8	87,1	85,4	80,2	56,9	69,2

TABEL GAMBAR 4 : Konsentrasi $\text{FeSO}_4 = 2500 \text{ ppm}$ (0,25 gr/100 cc)

Waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
Cacah per menit/cc	: 22	10	11	14	21	22
Effisiensi pemisahan (%)	: 81,1	91,4	90,5	87,9	81,9	81,1

TABEL GAMBAR 4 : Untuk konsentrasi $\text{FeSO}_4 = 3000 \text{ ppm}$ (0,30 gr/100 cc)

Waktu enap (hari)	: 1	2	3	4	5	6
Cacah per menit/cc	: 24	32	10	17	16	24
Effisiensi pemisahan (%)	: 79,3	72,5	91,4	85,4	86,2	79,3

VII. PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN

1. Dari hasil penggambaran secara grafik pada gambar 1 dapat kita lihat hubungan antara pengaruh kondisi pH larutan Sr^{90} terhadap efisiensi pemisahan menunjukkan kecenderungan bahwa dengan kenaikan harga pH efisiensi pemisahan cenderung naik. Kesimpulan yang dapat diambil dari peristiwa ini ialah bahwa dengan kenaikan harga pH berarti kondisi larutan semakin alkalis (konsentrasi ion OH^- makin besar) berarti endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2/\text{Fe}(\text{OH})_3$ secara kuantitatif semakin besar sehingga luas bidang adsorbent semakin besar juga dan daya pisahnya akan semakin besar. Di mana didapatkan kondisi pH yang optimum : 10 - 11.
2. Demikian pula pada gambar 2 : terlihat bahwa pada kondisi pH optimum (11) menunjukkan kecenderungan naik efisiensi pemisahannya, karena kondisi pH ini ternyata memberikan juga hasil endapan yang kuantitatif.
3. Pada gambar 3 : hubungan waktu pengadukan versus efisiensi pemisahan ternyata kenaikan waktu pengadukan tidak linier efisiensi pemisahan dan dari grafik terlihat bahwa waktu pengadukan selama 30 menit memberikan efisiensi pemisahan yang maksimum.
Kesimpulan yang dapat kami tarik ialah dengan waktu pengadukan selama 30 menit merupakan saat yang sudah cukup jenuh bagi endapan untuk mengadsorpsi ion Sr^{++} atau mungkin waktu sudah cukup untuk tenaga kinetik supaya terjadi antar aksi antara partikel endapan sebagai adsorbent dengan ion-ion sebagai zarah teradsorpsi sehingga

Dengan penambahan waktu di atas 30 menit mungkin justru tenaga kinetik berlebihan dan kebolehjadian antar aksi makin kecil akibatnya ion-ion sebagai zarah teradsorpsi lebih cenderung sebagai ion bebas di dalam larutan.

4. Pada gambar 4 hubungan antara waktu enap atau waktu di mana fase endapan tetap tinggal dalam larutan pada berbagai-bagai konsentrasi. Daerah di mana kurva menunjukkan waktu enap dengan pemisahan yang effisiensinya maksimum ialah pada daerah waktu enap sekitar 3 hari. Berarti bahwa kekekalan endapan dipengaruhi oleh waktu di mana fase endapan tinggal dalam fase larutan, dengan makin lama waktu tinggalnya dalam larutan berarti kecondongan dari ion-ion yang teradsorpsi kembali kelarutan semakin besar (atau desorpsi semakin besar). Atau mungkin juga terjadi deformasi dari partikel endapan oleh pengaruh fluktuasi temperatur dan tekanan. Agar dapat tercapai pemisahan yang maksimum kiranya perlu diperhatikan faktor-faktor yang tersebut di atas.

DAFTAR PUSTAKA

1. *"Waste treatment and environmental aspects of atomic energy"*, Peaceful Uses of Atomic Energy Agency, Vienna, vol. 18, 1958.
2. *"Management of Radioactive Waste from the Nuclear Fuel Cycle"*, International Atomic Energy Agency, Vienna, safety series, vol 1 1976.
3. *"Basic factors for the treatment and disposal of radioactive waste"*, International Atomic Energy Agency, Vienna, safety series, vol 24, 1967.
4. *"Chemical treatment of radioactive wastes"*, Technical Reports Series No. 89, 1968.
5. Weiser et al., *"Introduction to colloid chemistry "*.
6. Kaufman, Nesbitt et al. *"The Removal of Radioactive Anions by Water treatment"*.