



KAJIAN PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR HASIL OLAH-ULANG BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS DENGAN METODA PENGENDAPAN KIMIA

Arief Heru Kuncoro, M. Djoko Birmano
Pusat Pengkajian Energi Nuklir

ABSTRAK

KAJIAN PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR HASIL OLAH-ULANG BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS DENGAN METODE PENGENDAPAN KIMIA. Proses olah-ulang bahan bakar bekas reaktor nuklir akan menimbulkan limbah radioaktif cair cukup banyak, yang mengandung sisa uranium dan unsur-unsur transuranium. Untuk itu telah dilakukan kajian terhadap pengolahan limbah cair tersebut dengan metode pengendapan kimia dengan larutan FeCl_3 sebagai pengendap (*koagulan*). Dengan diketahuinya aktivitas limbah awal dan beningan maka dapat dihitung faktor dekontaminasi dan efisiensi pemisahannya. Disimpulkan bahwa faktor-faktor pH pengolahan, jumlah koagulan, kecepatan dan waktu pengadukan sangat berpengaruh terhadap hasil pengolahan.

ABSTRACT

THE ASSESSMENT OF RADIOACTIVE LIQUID WASTE TREATMENT GENERATED FROM THE FUEL REPROCESSING PLANT USING CHEMICAL COAGULATION METHOD. Reprocessing of nuclear spent fuel produced a lot of radioactive liquid waste still bearing uranium and transuranium. The assessment of the radioactive liquid waste treatment with FeCl_3 as coagulant has been done. Decontamination factor and separation efficiency can be calculated from known activities of initial and post-treatment wastes. It can be concluded that some factors i.e. pH of treatment process, quantity of coagulant, mixing rate, and mixing time have influenced the treatment product.

PENDAHULUAN

Pengembangan teknologi yang banyak menarik perhatian dewasa ini adalah pengembangan teknologi nuklir. Hal ini karena adanya dampak yang diperkirakan dapat berpengaruh terhadap manusia dan lingkungan.

Dalam pengembangan pemakaian teknologi nuklir terutama untuk penyediaan energi listrik PLTN, telah dikembangkan cara pengelolaan limbah yang sebaik-baiknya agar tidak mempengaruhi dan membahayakan manusia dan lingkungannya.

Instalasi olah-ulang bahan bakar nuklir adalah instalasi yang banyak menghasilkan limbah cair yang mengandung unsur-unsur transuranium, yaitu unsur-unsur yang mempunyai nomor atom lebih besar dari uranium yang mempunyai nomor atom 92. Transuranium sering disebut unsur buatan atau sintesis karena untuk mendapatkannya dengan cara menembak unsur uranium dengan neutron di dalam reaktor fisi. Unsur-unsur yang termasuk dalam unsur transuranium adalah Neptunium (Np), Plutonium (Pu), Amerisium (Am) dan lain sebagainya. Unsur-unsur tersebut didapat dalam bahan bakar bekas reaktor fisi yang

berbahan bakar uranium. Limbah radioaktif cair yang mengandung unsur-unsur transuranium ini dapat membahayakan lingkungan bila dibuang begitu saja, terlebih lagi untuk masa yang akan datang dengan adanya PLTN di Indonesia tentunya akan banyak menghasilkan bahan bakar bekas yang masih memiliki nilai ekonomi tinggi.

Pada pengoperasian PLTN dihasilkan limbah radioaktif dan bahan bakar nuklir bekas (Table 1). Bahan bakar bekas ini mengandung sejumlah bahan bakar yang dari segi ekonomi dapat digunakan lagi, misalnya bahan fertil (U-238 atau Th-232) dan nuklida fisi (U-235, Pu-239 atau U-233), oleh karena itu dilakukan proses olah-ulang bahan bakar bekas yang bertujuan untuk :

- Memisahkan elemen hasil fisi yang tidak digunakan lagi.
- Mengambil plutonium, uranium dan thorium untuk digunakan lagi sebagai bahan bakar.

Kajian mengenai pengolahan awal limbah radioaktif cair hasil olah-ulang dengan metode pengendapan kimia dengan menggunakan FeCl_3 sebagai pengendap (*koagulan*) ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel : pH pengolahan, jumlah

dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel : pH pengolahan, jumlah *koagulan*, kecepatan pengadukan dan lama pengadukan.

PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR HASIL OLAH-ULANG DENGAN METODE PENGENDAPAN KIMIA

1. Pengolahan Limbah Radioaktif Cair dengan Prinsip Pengendapan Kimia

Prinsip yang digunakan dalam pengolahan limbah radioaktif cair dengan metode pengendapan kimia ini adalah mekanisme koagulasi dan flokulasi dengan menggunakan larutan garam ferri $FeCl_3$ sebagai koagulan.

1.1. Proses Koagulasi-Flokulasi

Koagulasi dan flokulasi adalah proses kimia yang bertujuan untuk mengikutsertakan unsur-unsur dalam proses pengendapan kimia.

Pengolahan limbah secara kimia biasanya dilakukan dengan menambahkan koagulan-koagulan tertentu pada limbah. Koagulasi kimia termasuk destabilisasi, pembentukan ikatan bersama dari koloid, di mana koloid ini membentuk gumpalan kimia atau flok yang mengadsorpsi, menangkap atau mungkin membawa bersama suspensi padat yang ada dalam limbah cair. Pada pengendapan, zat kimia ditambahkan untuk menghasilkan endapan-endapan kuat yang tidak larut, yang akan membawa radionuklida sewaktu mengendap.

Koagulasi dan flokulasi mungkin terjadi secara simultan atau mungkin termasuk pembentukan suspensi yang memerlukan zat flokulan.

Ada tiga langkah dalam proses koagulasi dan flokulasi :

1. Penambahan zat koagulan ke dalam limbah cair, untuk meyakinkan agar zat kimia tersebut terbagi secara merata dalam seketika perlu pengadukan cepat (*flash mixing*). Hal ini sangat penting, apabila tidak maka koagulasi akan tersebar secara perlahan-lahan dan reaksi kimia awal hanya terlokalisasi pada titik pemberian koagulasi. Pengadukan cepat ini dilakukan dalam waktu yang singkat untuk menghindari pecahnya endapan yang telah terbentuk.
2. Koagulasi terbentuk karena reaksi kimia maupun kimia fisik yang kompleks dan

perubahan terjadi mengarah ke pembentukan endapan padat yang halus.

3. Penetrasi muatan elektrik pada masing-masing partikel dispers, yang disebut potensial zeta, untuk menghilangkan gaya tolak-menolak diantaranya, sehingga membantu terjadinya penggumpalan. Netralisasi potensial zeta dicapai melalui penambahan muatan elektrik yang berlawanan ke dalam air limbah. Agen penetral dapat sekaligus koagulan itu sendiri.

Fase ini memerlukan pengadukan lambat dalam waktu yang cukup lama untuk memberi kesempatan partikel-partikel *dispers* saling kontak dan bertumbukan satu sama lain tanpa menimbulkan pecahnya endapan awal, melainkan justru terjadi kontak dan saling menempel satu sama lain hingga membentuk gumpalan yang lebih besar yang disebut flok. Keadaan ini dapat terjadi karena penurunan potensial zeta dari partikel-partikel dalam larutan. Fase ini dinamakan fase flokulasi.

1.2. Proses Pengambilan Radionuklida

Pengambilan radionuklida yang ada dalam cairan limbah radioaktif dalam proses koagulasi-flokulasi dapat dengan cara pengendapan langsung, serapan pada gumpalan yang dihasilkan dan dengan cara pertukaran ion.

1.2.1. Pengendapan Langsung

Radionuklida sulit diendapkan secara langsung karena konsentrasinya berada di bawah hasil kali kelarutan. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan perlu ditambahkan pengemban (*carrier*) baik berupa isotop stabil dari radionuklida yang dipisahkan maupun berupa unsur non aktif dari isotop lain yang mempunyai sifat kimia sejenis seperti penggunaan barium atau kalsium untuk mengendapkan radiostronsium, thorium, plutonium dan sebagainya. Dengan penambahan pengemban diharapkan terjadi pembentukan kristal bersama.

1.2.2. Serapan pada Gumpalan yang dihasilkan

Ion-ion aktif dapat juga terdekontaminasi dari air limbah karena terserap oleh endapan yang terbentuk pada waktu koagulasi-flokulasi. Mekanisme serapan tergantung pada tipe endapan. Pada endapan kristalin, partikel-

partikel primer menangkap zat pengotor dan selanjutnya terjadi peristiwa berkurangnya zat pengotor tersebut pada saat butir partikel membesar karena proses pertumbuhan yang dinamakan peristiwa okulasi. Kejadian ini dinamakan serapan dalam (absorpsi). Pada endapan gelatin, karena tidak ada proses pertumbuhan yang berarti, zat pengotor tetap hanya menempel di permukaan. Kejadian ini dinamakan serapan permukaan (*adsorbsi*).

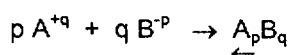
1.2.3. Pertukaran Ion

Beberapa endapan mempunyai ion yang dapat dipertukarkan dengan ion-ion yang terkandung dalam larutan, misalnya pada pembentukan zirkonium fosfat untuk mengikat caesium, pengendapan asam poliantimonik untuk mengikat stronsium, serta kation bivalen tertentu (Ca^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , dsb.) terhadap ferro sianida.

2.. Pengendapan Kimia Dengan Menggunakan Garam Ferri

Dalam kajian ini untuk memisahkan unsur-unsur transuranium dalam limbah radioaktif cair digunakan pengendapan ferri hidroksida. Reagen yang digunakan adalah FeCl_3 dan NaOH . FeCl_3 berfungsi sebagai pengendap (*koagulan*), sedangkan NaOH disamping untuk meningkatkan harga pH, ion OH^- berfungsi juga sebagai pasangan pembentuk endapan.

Secara skematis, reaksi pengendapan bisa ditulis sebagai berikut :

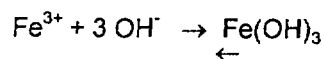


Hasil kali kelarutan :

$$K_{Sp} = [\text{A}^{+q}]^p [\text{B}^{-p}]^q$$

Apabila tetapan hasil kali kelarutan terlampaui, maka terbentuklah sejumlah partikel dispers inti endapan yang segera dilanjutkan dengan proses pertumbuhan inti, yakni bertambah besarnya ukuran partikel-partikel primer tersebut.

Pada proses pengendapan ferri hidroksida terjadi reaksi sebagai berikut :



Hasil kali kelarutan :

$$K_{Sp} = [\text{Fe}^{3+}] [\text{OH}^-]^3$$

Jika hasil kali kelarutan terlampaui maka ion Fe^{3+} akan mengikat ion-ion OH^- membentuk partikel primer inti endapan yang segera dilanjutkan dengan proses pertumbuhan inti yang menjadikan partikel itu mengendap.

Konsentrasi ion Fe^{3+} dalam larutan,

$$[\text{Fe}^{3+}] = \frac{K_{Sp}}{[\text{OH}^-]^3}$$

Dengan demikian untuk mengurangi pelarutan endapan yang terbentuk dapat dilakukan dengan penambahan ion hidroksida berlebihan. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kelarutan adalah kekuatan ion dari medium, adanya ion-ion sejenis dan pembentukan senyawa kompleks.

Pada pembentukan flok ferri hidroksida kation-kation logam polivalen akan terkopresipitasi dengan cara terserap ke dalam flok endapan, hanya logam-logam alkali dan alkali tanah tertentu yang terpengaruh. Dibandingkan dengan aluminium hidroksida, flok ferri hidroksida lebih kuat dan lebih mudah diendapkan serta proses dapat dijalankan pada pH yang lebih tinggi.

Pada proses koagulasi-flokulasi, ukuran dan muatan elektrik partikel primer inti endapan sangat dipengaruhi terutama oleh konsentrasi ion dan pH larutan. Pada umumnya ukuran partikel akan bertambah hingga mencapai maksimum dan kemudian kembali berkurang jika jumlah *reagen* terus ditingkatkan. Karena butir inti endapan gelatin jauh lebih kecil (yang dengan sendirinya jumlahnya jauh lebih banyak) dibandingkan endapan kristalin, maka peristiwa kopresipitasi pada serapan permukaan lebih banyak terjadi.

HASIL DAN BAHASAN

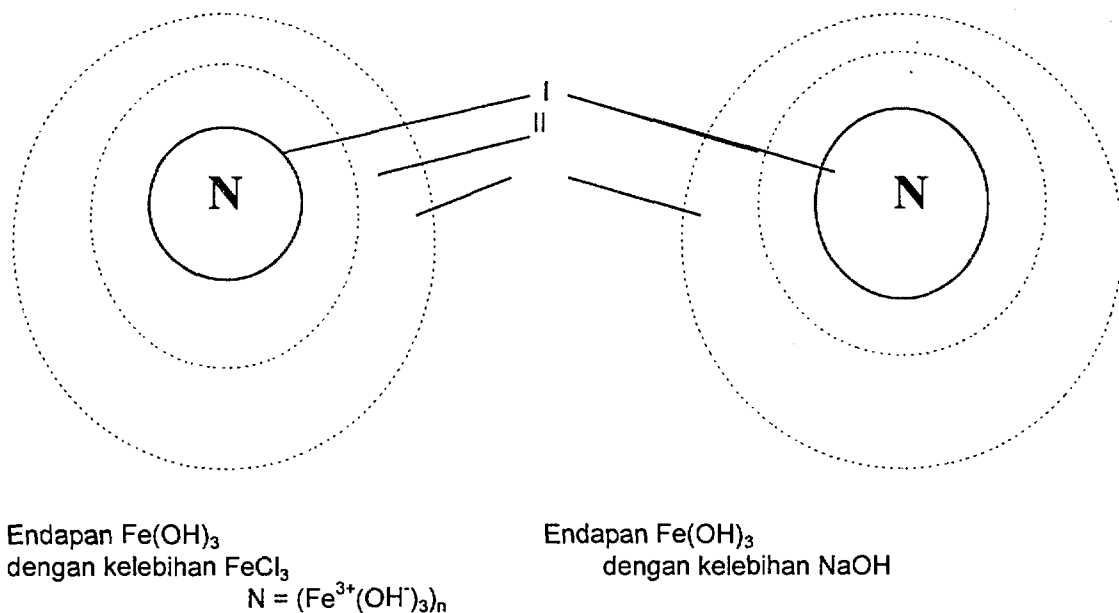
Dari beberapa hasil penelitian dan pengkajian dapat diketahui pengaruh dari variabel-variabel pH, jumlah koagulan, kecepatan pengadukan dan lama pengadukan.

Pada reaksi pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sangat dipengaruhi oleh konsentrasi (OH^-) yang ada dalam larutan. Adanya konsentrasi (OH^-) sangat mempengaruhi keasaman larutan (pH). Harga Faktor Dekontaminasi (FD) dan Efisiensi Pemisahan (EP) akan meningkat dengan meningkatnya harga pH. Dengan kenaikan harga pH, berarti kondisi larutan semakin alkalis (konsentrasi ion OH^- semakin besar) sehingga jumlah endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ secara kualitatif semakin besar. Dengan demikian luas bidang absorben makin besar, sehingga daya serapnya juga semakin besar.

Tetapi tidak selamanya meningkatnya harga pH pengolahan akan meningkatkan harga FD dan EP, sebab pada harga pH tertentu pengendapan akan mencapai optimum yang menyebabkan harga FD dan EP terbesar

(Gambar 2). Pada keadaan ini kenaikan harga pH pengolahan justru menyebabkan harga FD dan EP semakin turun. Hal ini bisa dijelaskan sebagai berikut :

Pada waktu koagulasi, terjadi mekanisme serapan seperti terlihat pada gambar 1. Pada koagulasi senyawa ferri hidroksida diduga terjadi pembentukan kelompok kritik $(\text{Fe}^{3+}(\text{OH}^-)_3)_n$, dimana harga n menentukan besar kecilnya ukuran partikel primer. Ukuran dan muatan elektrik partikel primer inti endapan sangat dipengaruhi terutama oleh konsentrasi ion dan pH larutan. Ion-ion hidrogen maupun hidroksida dapat terserap dengan mudah ke dalam inti endapan, maka muatan elektrik partikel primer pertama-tama adalah fungsi dari pH larutan. Endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bermuatan positif pada saat kelebihan FeCl_3 dan bermuatan negatif pada saat kelebihan NaOH . Ini berarti serapan pada lapisan sekunder butir terdispersi cenderung menyebabkan kopresipitasi anion pada pH rendah dan kation pada pH tinggi, sehingga secara hipotetis U sisa dan unsur-unsur transurium yang berada dalam limbah lebih banyak berada dalam bentuk kation.



Gambar 1. Mekanisme Serapan Endapan Ferri Hidroksida

Keterangan :

- I. Lapisan inner/primer (inti endapan)
- II. Lapisan penahan/sekunder (*Stern Layer*)
- III. Lapisan difusi

Pada saat penambahan NaOH masih kecil atau pada pH rendah, saat itu inti endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ masih bermuatan positif sehingga kation-kation akan terserap masuk ke lapisan primer inti endapan bersama ion-ion H_3O^+ . Pada saat pH mencapai optimum terjadi perubahan muatan elektrik inti endapan dari positif ke negatif dan kation-kation limbah tidak lagi terdifusi ke dalam inti endapan melainkan terserap ke lapisan penahan.

Pada pH yang lebih tinggi, FD dan EP cenderung turun kembali, karena konsentrasi ion OH^- yang berlebih akan menempati lapisan difusi butir endapan yang akan mempertebal lapisan difusi tersebut, sehingga akan mempersulit kation-kation limbah untuk masuk ke dalam lapisan penahan. Prinsip yang digunakan pada pengolahan limbah radioaktif dengan metode pengendapan kimia ini adalah mekanisme koagulasi flokulasi dan kopresipitasi, sehingga jumlah koagulan sangatlah berpengaruh terhadap hasil pengolahan. Semakin tinggi konsentrasi yang ditambahkan maka faktor dekontaminasi (FD) dan efisiensi pemisahan (EP) yang diperoleh juga makin tinggi. Dalam hal ini proses pembentukan inti dan pertumbuhan inti endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ terjadi bersama-sama, sehingga baik muatan positif inti endapan maupun luas permukaan lapisan penahan semakin bertambah dengan meningkatnya jumlah FeCl_3 yang ditambahkan.

Pada saat konsentrasi FeCl_3 mencapai optimum, proses pembentukan dan pertumbuhan inti mencapai maksimal dan pada penambahan konsentrasi FeCl_3 , ukuran butir endapan akan berkurang (Gambar 3). Pada penggunaan FeCl_3 yang berlebihan meskipun jumlah butir inti endapan semakin banyak tetapi ukuran butir lebih kecil, sehingga daya serapnya terhadap kation-kation limbah transurium dan U lebih rendah. Hal ini sesuai dengan yang dikatakan Von Weiman bahwa pada umumnya ukuran partikel akan bertambah hingga mencapai maksimum dan kemudian kembali berkurang jika jumlah reagen terus ditingkatkan.

Dari beberapa penelitian dan kajian menunjukkan adanya pengaruh kecepatan pengadukan terhadap hasil pengolahan. Harga FD dan EP semakin besar sesuai dengan naiknya kecepatan pengadukan cepat, sampai mencapai harga yang optimum. Jika kecepatan pengadukan diperbesar, harga FD justru menurun (Gambar 4). Sebab jika kecepatan

pengadukan awal terlalu cepat, maka akan mengakibatkan waktu kontak antara kation-kation limbah transurium dan U dengan butir-butir endapan menjadi semakin kecil, sehingga kation-kation limbah yang seharusnya bisa terserap ke dalam butir-butir endapan menjadi terlepas.

Dengan pengadukan cepat akan terbentuk butir-butir endapan dalam bentuk koloid yang halus (flok), sedang dengan kecepatan pengadukan lambat apabila masih ada partikel-partikel limbah yang melayang dapat diserap oleh inti flok tersebut (Gambar 5).

Dari beberapa penelitian dan kajian yang telah dilakukan juga menunjukkan adanya pengaruh lama pengadukan terhadap hasil pengolahan limbah. Semakin lama pengadukan awal (cepat) maka FD dan EP semakin besar, sampai didapatkan lama pengadukan yang optimum yang memberikan harga FD dan EP maksimal. Jika pengadukan semakin lama, harga FD dan EP cenderung turun, karena makin lama pengadukan menyebabkan inti endapan (flok) yang telah terbentuk pecah kembali, sehingga daya serapnya terhadap kation-kation limbah U dan transurium menurun, yang mengakibatkan turunnya harga FD dan EP (Gambar 6).

Setelah pengadukan cepat dilanjutkan pengadukan lambat. Harga FD dan EP meningkat dengan bertambahnya lama pengadukan lambat, karena dengan bertambahnya lama pengadukan menyebabkan kebolehdjian kontak antara kation-kation limbah U dan transurium dengan flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bertambah besar. Hal ini berlangsung hingga kebolehdjian kontak antara kation-kation limbah dengan flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tersebut menjadi optimum. Bila pengadukan lambat diperlama, maka kation-kation limbah U dan transurium yang telah terserap ke dalam flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ akan lepas kembali sehingga harga FD dan EP cenderung turun (Gambar 7).

SIMPULAN

1. Pada pembentukan flok ferri hidroksida, kation-kation logam polivalen akan terkopresipitasi dengan cara terserap ke dalam flok endapan, sedangkan pada koagulasi senyawa ferri hidroksida diduga terjadi pembentukan kelompok kritik

2. $(\text{Fe}^{3+}(\text{OH})_3)_n$. Ukuran dan muatan elektrik partikel primer inti endapan sangat dipengaruhi terutama oleh konsentrasi ion dan pH larutan. Endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bermuatan positif pada saat kelebihan FeCl_3 dan bermuatan negatif pada saat kelebihan NaOH . Ini berarti serapan pada lapisan sekunder butir terdispersi cenderung menyebabkan kopresipitasi anion pada pH rendah dan kation pada pH tinggi, sehingga U sisa dan unsur-unsur transuranium yang berada dalam limbah lebih banyak berada dalam bentuk kation. Proses pembentukan inti dan pertumbuhan inti endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ terjadi bersama-sama, sehingga baik muatan positif inti endapan maupun luas permukaan lapisan penahan semakin besar dengan meningkatnya jumlah FeCl_3 . Pada saat konsentrasi FeCl_3 mencapai optimum, proses pembentukan dan pertumbuhan inti mencapai maksimal dan pada penambahan konsentrasi FeCl_3 , ukuran butir endapan akan berkurang. Pada penggunaan FeCl_3 yang berlebihan, meskipun jumlah butir inti endapan semakin banyak, tetapi ukuran butir lebih kecil, sehingga daya serapnya terhadap kation-kation limbah transuranium dan U lebih rendah. Dengan diketahuinya aktivitas limbah awal dan beningan maka dapat dihitung faktor dekontaminasi dan efisiensi pemisahannya.
3. Variabel-variabel yang sangat berpengaruh dalam pengolahan limbah cair dengan metode pengendapan kimia adalah : pH

pengolahan, jumlah koagulan, kecepatan pengadukan dan lama pengadukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BENEDICT, M., PIGFORD, T.H. and LEVI, H.W., "Nuclear Chemical Engineering", Second Edition, Mc. Graw Hill Co., 1981.
- [2] CARLEY-MACAULY, K.W., et.al., "Radioactive Waste : Advanced Management Methods for Medium Active Liquid Waste", Vol.1, Commission of the European Communities, Brussels & Luxemburg, 1981.
- [3] IAEA, "Treatment of Low and Intermediate Level Radioactive Waste Concentrates", IAEA, Vienna, Austria, 1968.
- [4] JOHANNES, H., "Kimia Koloid dan Kimia Permukaan", Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 1974.
- [5] RONODIRDJO, S., "Diktat Kuliah Pengolahan Sampah Radioaktif", Jurusan Teknik Nuklir, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 1987.
- [6] BIRMANO, M.D., "Pengolahan Awal Limbah Radioaktif Cair yang Mengandung Uranium dan Amerisium dengan Metode Pengendapan Kimia", Skripsi, Jurusan Teknik Nuklir, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 1993.
- [7] NEWJEC, Inc., "Final Feasibility Study Report of the First Nuclear Power Plants at Muria Peninsula Region, Central Java", Jakarta, 1993.

LAMPIRAN

Tabel 1. Bahan Bakar Bekas Yang Dihasilkan dari PLTN

Type, Vendor	600 Mwe			900 - 1000 MWe					Advanced Type			
	PWR		PHWR	PWR			BWR	PHWR	AP600	SBWR	CANDU 3	
	MHI/W H	NPI (Siem.)	AECL	MHI/W H	NPI (Siem.)	NPI (Fram.)	GE	AECL	WH	GE	AECL	
Net Electrical Output (1) [Mwe]	615	646	638	866	1060	994	952	881	631	635	432	
Fuel Cycle Length (2) [EFPM]	10.6	11.6	12	11	11.6	11	17.3	12	15.3	22.2	12	
Average Discharge Burn-up (3) [GWD / MtU]	41.1	45.3	7.5	42.2	45.2	47.7	38.4	6.5	40.7	38.2	6.5	
Generate d Spent Fuel (MtU)	for 1 Fuel Cycle Operation (4)	14.8	14.8	112	20.3	24.0	20.3	39.7	174	22.1	35.4	89.5
	for Average 1 Year Operation (5)	13.4	12.2	89.6	17.7	19.9	17.7	22.0	139.2	13.9	15.3	71.6
	for 10 ³ Gwh Generation (6)	3.1	2.7	20.0	2.9	2.7	2.5	3.3	22.6	3.1	3.4	23.7

Note :

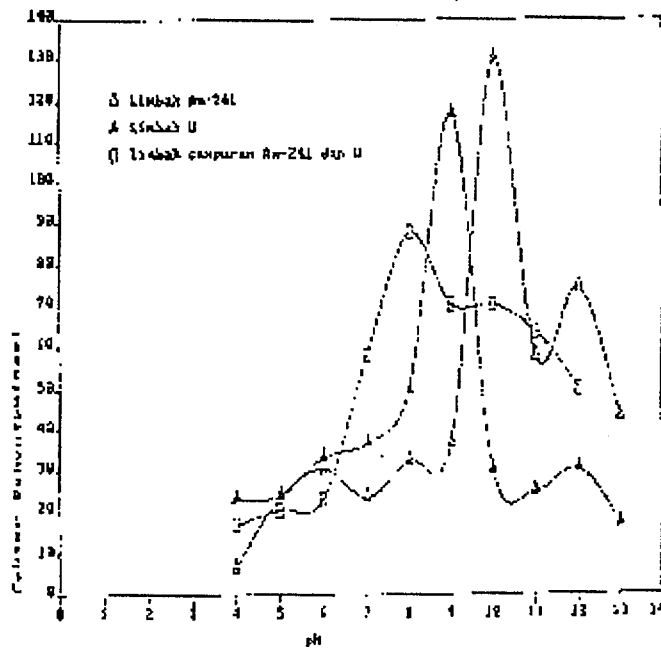
(1), (2), (3), (4) : Source "Fuel Cycle Evaluation" (INPB-D-002)

(5) = (4) / { (2)/12 x 1/0.8 } (80% capacity factor)

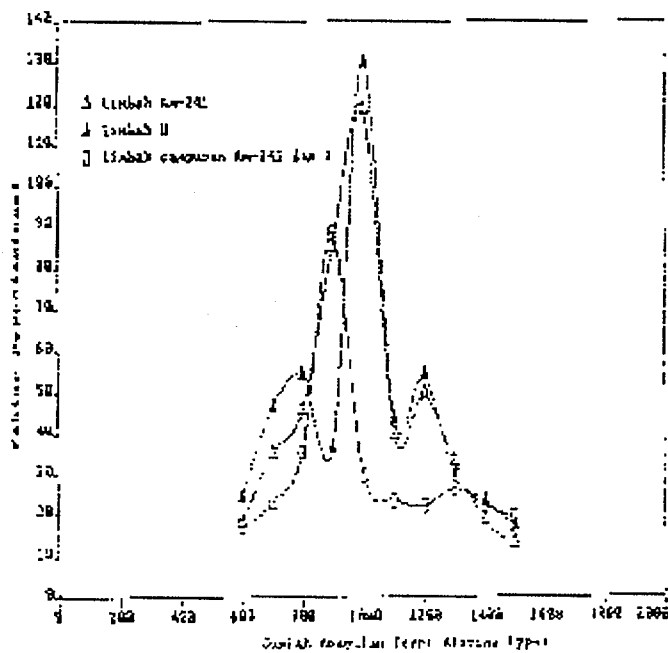
(6) = (4) / { (1) x (2)/12 x 8760 / 1000000 }

EFPM = Effective Full Power Month

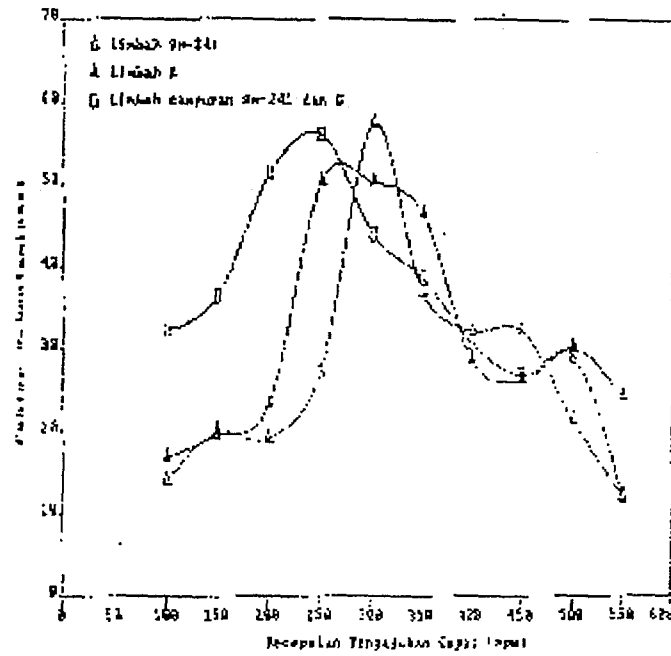
Data diambil dari "Feasibility Study Report, INPB-REP-3, NEWJEC, Inc., 1993"



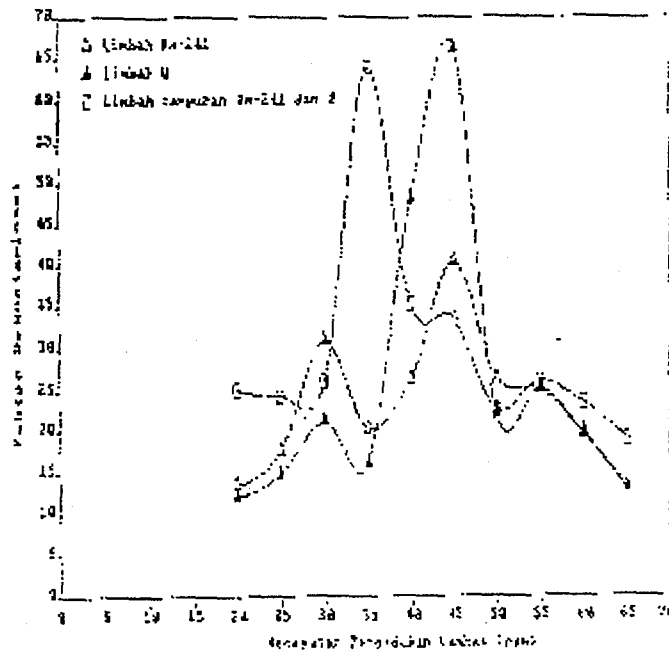
Gambar 2. Grafik Hubungan pH Pengolahan terhadap Faktor Dekontaminasi



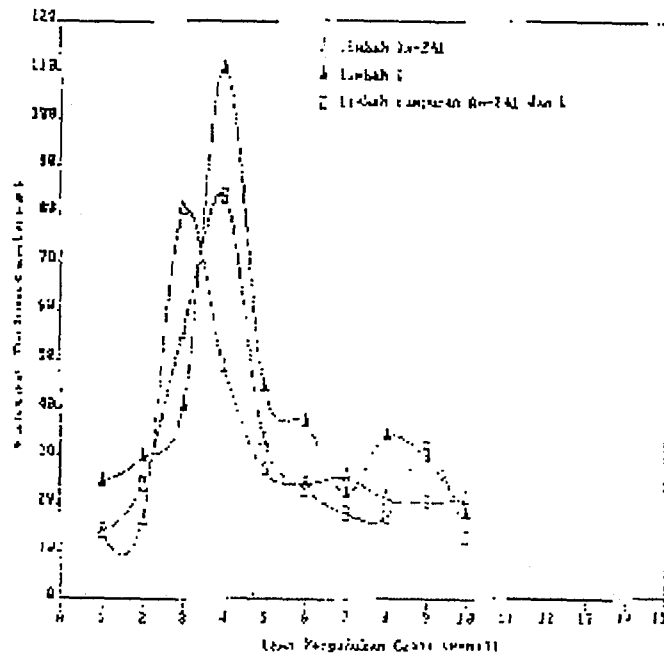
Gambar 3. Grafik Hubungan Jumlah Koagulan Ferri Klorida terhadap Faktor Dekontaminasi



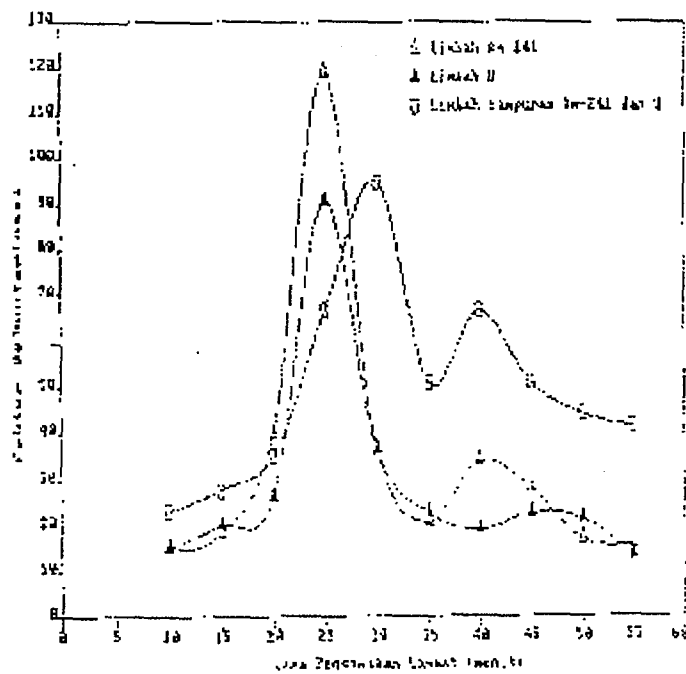
Gambar 4. Grafik Hubungan Kecepatan Pengadukan Cepat terhadap Faktor Dekontaminasi



Gambar 5. Grafik Hubungan Kecepatan Pengadukan Lambat terhadap Faktor Dekontaminasi



Gambar 6. Grafik Hubungan Lama Pengadukan Cepat terhadap Faktor Dekontaminasi



Gambar 7. Grafik Hubungan Lama Pengadukan Lambat terhadap Faktor Dekontaminasi

TANYA JAWAB**1. Prayitno**

- Mohon penjelasan bagaimana terjadinya proses koagulasi-flokulasi dan terangkan mekanisme reaksinya secara kimia dan fisik.
- Jelaskan bagaimana pengaruh pengembun terhadap FD dan EP.

Arief Heru Kuncoro

- Penjelasan proses koagulasi-flokulasi dapat dilihat pada subbab II.I.I di dalam makalah dan mekanisme reaksinya secara kimia dan fisik dapat pula dilihat pada Bab III hasil kajian di dalam makalah.

2. Fathurrachman

- Jelaskan limbah yang mana yang sudah dikaji untuk di koagulasi dengan FeCl_3 .

Arief Heru Kuncoro

- Limbah yang telah dilakukan pengkajian adalah limbah hasil olah ulang dengan aktivitas rendah (LLW).

3. Susilaningtyas

- Mohon penjelasan mengapa dipilih FeCl_3 sebagai pereaksi pengendap dan NaOH sebagai pasangan pembentuk pengendap.

Arief Heru Kuncoro

- FeCl_3 hanya merupakan salah satu opsi penelitian/kajian, sedangkan NaOH dipilih sebagai pasangan pembentuk endapan karena mudah diperoleh, harganya murah dan NaOH dapat berfungsi pula meningkatkan harga pH.

4. Harmin. M

- Mengapa tidak menambah bahan kimia lain, seperti $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ atau $\text{Al}(\text{SO}_4)$ untuk mempercepat proses pengendapan.
- Mohon penjelasan, bagaimana proses selanjutnya terhadap endapan (*sludge*) yang terbentuk.

Arief Heru Kuncoro

- Pemilihan bahan pengendap FeCl_3 hanya merupakan salah satu opsi penelitian. selain itu, proses pengendapan kimia dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :
 - proses soda kapur dengan menambah CaCO_3 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$

- koagulasi dengan terminiu dengan menam-bahkan tawas $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- koagulasi dengan fospat dengan menambah NaOH dan Na_3PO_4
- pengendapan dengan senyawa sianida.
- Endapan (*sludge*) yang dihasilkan diproses lanjut dengan cara proses sementasi, bituminasi atau vitrifikasi.

5. M. Setyadji

- Mohon penjelasan mengapa terjadi penurunan ukuran butir endapan bila penambahan FeCl_3 berlebihan dengan kecepatan pengadukan tetap.

Arief Heru Kuncoro

- Apabila waktu pengadukan yang optimum dilampaui, maka makin lama waktu pengadukan akan menyebabkan inti endapan yang telah terbentuk pecah kembali. Hal ini mengakibatkan daya serap terhadap kation-kation limbah U menjadi menurun, sehingga harga FD dan EP menurun. Selain itu, penggunaan FeCl_3 yang berlebihan menyebabkan jumlah butir inti endapan semakin banyak, namun demikian ukuran butirnya relatif lebih kecil, dan hal ini mengakibatkan daya serapnya menurun.

6. Maniar

- Jelaskan bagaimana pengaruh kecepatan dan lama pengadukan terhadap pembentukan endapan.

Arief Heru Kuncoro

- Harga FD dan EP semakin besar sesuai dengan meningkatnya kecepatan pengadukan hingga mencapai harga optimum. Apabila kecepatan tersebut semakin meningkat, maka harga FD akan menjadi menurun. Hal ini terjadi karena waktu kontak antara kation-kation limbah U dengan butir-butir endapan menjadi semakin kecil, sehingga kation-kation limbah tersebut yang seharusnya dapat terserap ke dalam butir-butir endapan menjadi terlepas. Apabila waktu pengadukan semakin lama, maka harga FD dan EP menjadi semakin besar hingga harga maksimal. Hal ini terjadi pada saat pengadukan awal.