

Model Matematik Reduksi Thorium dalam Proses Elektrokoagulasi

Thorium Reduction Mathematical Model on Electrocoagulation Process

Prayitno* dan Vemi Ridantami

¹Pusat Sains Teknologi Akselerator-BATAN, Jalan Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta, Indonesia, 55281

*E-mail: prayitno01@batan.go.id

Naskah diterima: 14 Juni 2017, direvisi: 20 November 2017, disetujui: 30 November 2017

DOI: <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2017.38.2.3566>

ABSTRAK

Reduksi thorium dengan elektrokoagulasi telah dilakukan pada limbah radioaktif yang memiliki kadar kontaminan thorium $5 \times 10^{-4} \text{ kg/l}$ dengan sistem *batch* menggunakan elektrode-elektrode aluminium. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui model matematik reduksi thorium melalui kecepatan reaksi, konstanta laju reaksi, dan orde reaksi yang dipengaruhi oleh parameter proses elektrokoagulasi seperti tegangan, waktu, jarak elektrode, dan pH. Penelitian menghasilkan kondisi optimum tegangan 12,5V, jarak 1 cm, pH 7, dan waktu proses 30 menit dengan efisiensi sebesar 99,6%. Prediksi nilai konstanta laju penurunan thorium didapatkan melalui perhitungan matematika dengan metode integral. Hasil penelitian menunjukkan laju penurunan thorium mengikuti konstanta orde dua dengan nilai konstanta laju penurunan thorium $5 \times 10^{-3} \text{ KgL}^{-1} \text{ min}^{-1}$.

Kata kunci: kinetika, elektrokoagulasi, plat aluminium, thorium

ABSTRACT

Thorium reduction by electrocoagulation has been conducted on radioactive waste with thorium contaminant grade of $5 \times 10^{-4} \text{ Kg/l}$ through a batch system using aluminium electrodes. This study aims to determine a mathematical model of thorium reduction through speed reaction, constant reaction rate and reaction order which are affected by electrocoagulation process parameters like voltage, time, electrode distance, and pH. The research results the optimum voltage condition at 12.5 V at 1 cm electrode spacing, pH 7, and 30 minutes of processing time with 99.6 % efficiency. Prediction on thorium decline rate constant is obtained through mathematic integral method calculation. The research results thorium decline rate is following second order constant with its value at $5 \times 10^{-3} \text{ KgL}^{-1} \text{ min}^{-1}$.

Keywords: kinetic, electrocoagulation, aluminium plate, thorium

PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun terakhir ini, proses elektrokoagulasi telah menjadi alternatif pengolahan limbah, beberapa aplikasinya adalah untuk pengolahan limbah yang mengandung logam berat, boron, stronsium, cesium dan dapat digunakan untuk pengolahan air minum. Aplikasi proses elektrokoagulasi merupakan terobosan baru untuk pengembangan metode pengolahan limbah yang dapat diaplikasikan dalam unit

kecil ataupun industri, dapat menghemat biaya operasi dan tentunya ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan kimia. Terkait aplikasi tersebut, mempelajari proses elektrokoagulasi dalam limbah thorium menjadi sangat penting sekali.

Elektrolisis merupakan proses kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia (Gambar 1). Pada proses ini katode merupakan kutub negatif dan anode

merupakan kutub positif. Komponen utama yang berperan dalam proses elektrolisis yaitu:

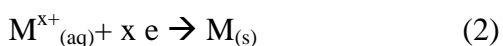
- Elektrolit merupakan zat yang mengandung ion bebas yang merupakan pembawa arus listrik dalam elektrolit. Elektrolit umumnya berbentuk asam, basa, dan garam.
- Sumber arus listrik searah (DC), berperan sebagai penyedia energi yang diperlukan untuk membuat atau melepaskan ion dalam elektrolit.
- Elektrode merupakan sebuah penghantar listrik antara sumber listrik atau rangkaian listrik sebagai penyedia energi dan elektrolit. Elektrode dalam sel elektrokimia disebut dengan anode dan katode. Pada anode terjadi reaksi oksidasi, sedangkan pada katode terjadi reaksi reduksi. Elektrode yang digunakan kebanyakan terbuat dari logam.

Pada katode terjadi reaksi reduksi, yaitu kation ion positif ditarik oleh katode dan menerima tambahan elektron sehingga bilangan oksidasinya berkurang. Ketentuan reaksi pada katode sebagai berikut:

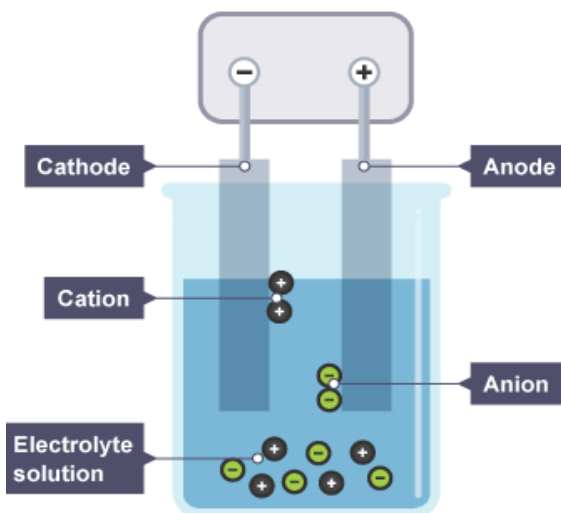
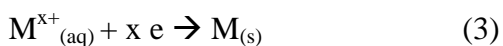
- Ion logam alkali (IA) dan alkali tanah (IIA) tidak direduksi, yang tereduksi air maka H_2O tereduksi menjadi H_2 .



- Jika kation tidak sukar tereduksi maka kation logam tersebut yang tereduksi menjadi logamnya.



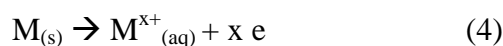
- Jika elektrolit berupa lelehan/leburan/cairan (tidak mengandung air) maka kation apapun tetap tereduksi menjadi logamnya.



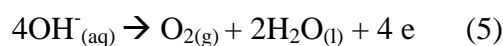
Gambar 1. Proses elektrolisis [1].

Oksidasi anode memperhatikan jenis elektrode dengan ketentuan:

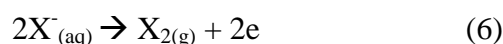
- Jika elektrode tidak inert maka yang teroksidasi adalah anode.



- Ion OH^- dari basa teroksidasi menjadi O_2 .



- Ion halida teroksidasi menjadi gas halogen.



Koagulasi adalah penggumpalan partikel koloid sehingga kestabilan sistem koloid menjadi hilang. Penyebab proses koagulasi salah satunya karena pengaruh elektroforesis (gerak partikel koloid yang bermuatan oleh pengaruh medan listrik). Proses koagulasi dengan menggunakan koagulan merupakan suatu proses destabilisasi dan penggabungan dari partikel-partikel koloid dan halus yang tersuspensi dengan menggunakan bahan koagulan [2]. Mekanisme kerja dari koagulan adalah kation metal akan bereaksi dengan hidroksida air membentuk metal hidroksida yang merupakan senyawa tidak larut. Partikel yang sudah tidak stabil bersama dengan metal

hidroksida tersebut menggumpal menjadi partikel-partikel kecil yang dapat dilihat mata yang disebut dengan flok. Semua reaksi dan mekanisme yang terlibat dalam pendestabilisasian partikel dan pembentukan partikel yang lebih besar melalui flokulasi termasuk sebagai koagulasi [3].

Koagulan dapat berupa garam-garam logam (anorganik) atau polimer (organik). Koagulan anorganik mencakup bahan-bahan kimia umum berbasis aluminium atau besi. Sedangkan polimer adalah senyawa organik sintesis yang disusun dari rantai panjang. Semua koagulasi menyisihkan zat koloid dan zat warna dari air dalam proses dengan membentuk hidroksida logam. Setiap koagulan mempunyai rentang kondisi pH optimum yang dapat diamati melalui percobaan di laboratorium [4].

Dengan adanya koagulan maka mekanisme destabilisasi partikel koloid, khususnya mekanisme pemerangkapan partikel koloid dalam endapan dapat terjadi. Partikel-partikel koloid dalam limbah yang ada akan terperangkap pada struktur flok hidroksida logam dan terbawa dalam endapan[5].

Pengelolaan limbah radioaktif cair telah dilakukan secara kimia dan fisika, yaitu dengan pemakaian bahan koagulan, evaporasi, dan penukar ion. Pengolahan secara kimia harus dipertimbangkan dalam hal penggunaan bahan kimia yang dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Selain itu, proses pengolahan kimia pada *effluent* masih sedikit mengandung logam berat dan zat padat terlarut sehingga belum dapat dibuang ke lingkungan sedangkan pengolahan limbah cair secara fisika seperti evaporasi, penukar ion, *reverse* osmosis, memerlukan biaya yang cukup mahal dan tidak cukup efektif untuk memindahkan kontaminan dalam air.

Beberapa tahun belakangan ini telah dikembangkan suatu alternatif pengolahan limbah menggunakan elektrokoagulator. Elektrokoagulasi diakui sebagai metode pengolahan berbagai jenis limbah dengan proses yang efektif [6]. Proses pengolahan limbah dengan metode ini dapat mengurangi biaya operasi, perawatan, dan tidak menggunakan bahan kimia sehingga perlu dilakukan studi terkait metode tersebut jika digunakan untuk pengolahan limbah thorium.

Pada banyak kasus, konstanta kecepatan reaksi hanya dapat diperoleh melalui percobaan. Reaktor yang digunakan adalah *batch* yang merupakan wadah sederhana untuk menampung zat-zat yang terlibat dalam reaksi selama reaksi berlangsung. Alat tersebut digunakan untuk menentukan kemajuan reaksi atau sudah seberapa banyak zat mengalami reaksi terhadap waktu dengan cara salah satunya mengamati perubahan konsentrasi komponennya.

Mempelajari kinetika dalam memperkirakan konstanta laju penurunan kontaminan dalam limbah yang menggunakan proses elektrokoagulasi telah dilakukan. Hasil penelitian diantaranya mempelajari kinetika pemindahan stronsium dan cesium dalam limbah cair merupakan reaksi orde dua [7], mempelajari kinetika pemindahan total organik karbon pada limbah lithografi merupakan reaksi orde dua [8], penurunan COD pada limbah tekstil merupakan orde satu [9].

Dari beberapa penelitian tersebut, penelitian ini untuk memperkirakan kontaminan thorium dalam limbah cair untuk proses elektrokoagulasi yang diasumsikan mengikuti orde satu atau orde dua (Gambar 2 dan 3). Metode yang digunakan untuk mencari nilai konstanta kecepatanreaksi dengan metode integral. Jika kita menganggap bahwa reaksi antara $\text{Al}(\text{OH})_3$

yang terbentuk dari proses elektrokoagulasi bereaksi dengan kontaminan thorium nitrat itu orde satu maka dapat diasumsikan bahwa $\text{Al}(\text{OH})_3$ terbentuk dan bereaksi dengan kontaminan tetap atau konstan sehingga persamaan kecepatannya adalah [10]:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (7)$$

Untuk persamaan ini, pemisahan dan integrasi menghasilkan:

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = k \int_0^t dt \quad (8)$$

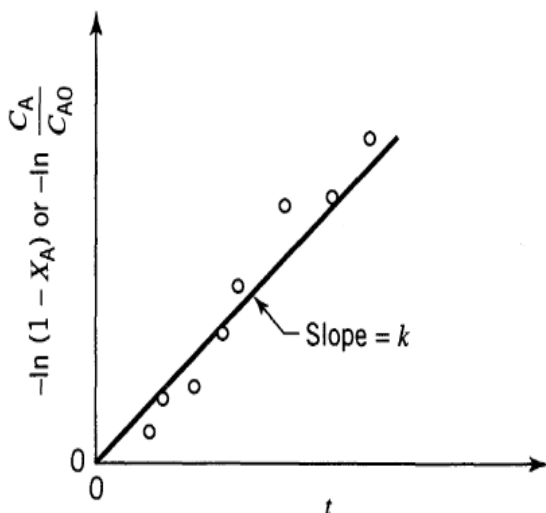
atau

$$-\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = kt \quad (9)$$

atau

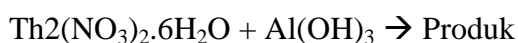
$$CA = CA_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (10)$$

dengan r_A adalah kecepatan pemindahan ion thorium dalam (ppm) dan k merupakan konstanta kecepatan orde satu dengan satuan min^{-1} .



Gambar 2. Kurva ilustrasi persamaan reaksi orde satu [10].

Jika kita menganggap bahwa reaksi itu orde dua maka reaksinya sebagai berikut:



Saat t=0	C_{A0}	C_{B0}	0
t=t	C_{A0-x}	C_{B0-x}	x

maka:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A C_B \quad (11)$$

$$-\frac{dC_A}{dt} = k(C_{A0} - x)(C_{B0} - x) \quad (12)$$

Jika diasumsikan $C_{A0} = C_{B0}$

makapersamaan kecepatannya sebagai berikut:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1 - X_A)^2 \quad (13)$$

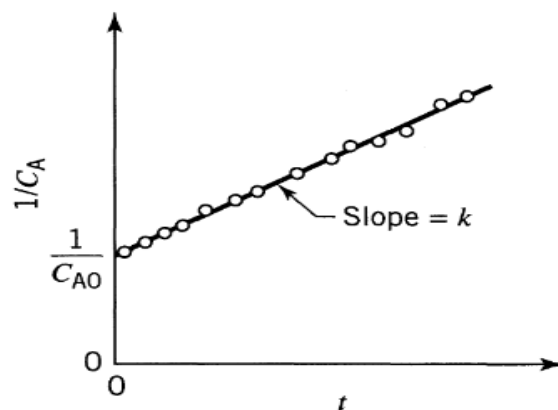
dan hasil integrasinya adalah:

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = \frac{1}{C_{A0}} \frac{X_A}{1 - X_A} = kt \quad (14)$$

Konsentrasi tergantung dari waktu sehingga dapat dirumuskan:

$$\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A0}} + kt \quad (15)$$

dengan k merupakan konstanta kecepatan orde dua, satuan $\text{ppm}^{-1} \text{min}^{-1}$.



Gambar 3. Kurva ilustrasi persamaan reaksi orde dua [10].

TATA KERJA

Bahan yang digunakan antara lain: thorium nitrat sebagai bahan pembuatan limbah simulasi; asam klorida (HCl); natrium

hidroksida (NaOH) sebagai bahan pengatur pH limbah; logam aluminium dengan ukuran 13x20 cm sebagai elektrode proses elektrokoagulasi; kertas tisu; kertas coklat sebagai alas agar peralatan tidak terkontaminasi; arsenazo III sebagai bahan pengomplek; Na_2CO_3 sebagai bahan campuran larutan pengomplek; asam oksalat bahan campuran analisis thorium; kertas saring; kertas pH bahan pembantu selama preparasi analisis; aquades dan aquabidest; masker; dan sarung tangan sebagai alat pelindung diri saat percobaan berlangsung.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: neraca analitik yang untuk menimbang bahan; spatula; peralatan gelas; *ependorf*; *tip blue*; planset; kuvet untuk membuat larutan simulasi sekaligus sebagai alat untuk preparasi sampel hasil proses elektrokoagulasi; dan pompa untuk memasukkan dan mengeluarkan limbah dari dalam bak elektokoagulator. Perangkat elektrokoagulator yang digunakan sebagai tempat proses elektrokoagulasi berukuran 22,5x14,5x20 cm terbuat dari kaca transparan sehingga berlangsungnya proses elektrokoagulasi dapat diamati secara visual. Alat ini juga dilengkapi dengan *power supply* untuk mengatur besarnya tegangan yang digunakan untuk proses elektrokoagulasi. Perangkat pencacah alpha-beta latar rendah digunakan untuk mengukur kandungan radioaktivitas di dalam limbah sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi. Spektrofotometer UV-Vis 1800 Shimadzu digunakan untuk mengukur konsentrasi sampel limbah untuk studi kinetika. Desikator digunakan untuk penghilangan uap air pada sampel setelah proses pengeringan

Metode penelitian yang digunakan adalah proses elektrokoagulasi limbah cair simulasi yang telah dibuat dimasukkan kedalam bak elektrokoagulasi. Setelah bak

elektrokoagulasi penuh dengan limbah, aliran arus listrik searah dihidupkan dengan menghidupkan adaptor dengan variasi tegangan 10V, 12,5V, dan 15 V; serta waktu operasi proses elektrokoagulasi divariasikan 0, 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit. Nilai optimum tegangan dan waktu tinggal digunakan untuk menentukan nilai optimum jarak elektrode 1 cm, 2 cm, 3 cm. Nilai optimum tegangan, waktu, dan jarak elektrode digunakan untuk menentukan nilai optimum pH 3,5, dan 7. Hasil proses elektrokoagulasi diambil sampelnya pada masing-masing parameter dan dilakukan karakteristik kadar radioaktif alpha.

Analisis data dilakukan dengan perhitungan efisiensi reduksi thorium dalam limbah cair yang dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$\eta (\%) = \frac{C_0 - C(t)}{C_0} 100 \% \quad (16)$$

dengan C_0 adalah konsentrasi awal uranium dan thorium dalam sampel limbah dan $C(t)$ adalah konsentrasi uranium dan thorium pada waktu tertentu.

Studi kinetik pada penelitian ini mengacu pada penurunan polutan thorium dalam limbah cair pada reaktor *batch*. Berdasarkan penelitian sebelumnya proses elektrokoagulasi untuk menghilangkan kontaminan mengikuti orde satu atau dua sehingga dapat diperkirakan perhitungan menggunakan persamaan orde satu dan orde dua. Persamaan kecepatan reaksi orde satu adalah $\frac{-dC}{dt} = -rA$ dan $-rA = k_1 \cdot C$, sehingga diperoleh persamaan:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-k_1 t} \quad (17)$$

nilai k_1 merupakan nilai konstanta kecepatan reaksi orde satu. Sedangkan persamaan kecepatan orde dua adalah $-rA = k_2 \cdot C^2$ sehingga diperoleh:

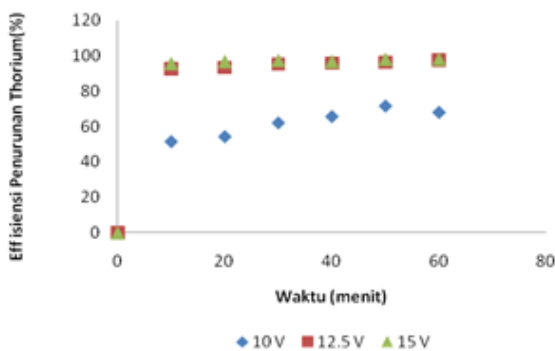
$$\frac{1}{c(t)} = \frac{1}{c_0} + k_2 \cdot t \quad (18)$$

Untuk memperkirakan orde reaksi digunakan metode substitusi dan grafik dimana metode substitusi dengan melihat nilai k masing-masing orde. Apabila setiap waktu mendekati konstan maka reaksi sesuai. Sedangkan metode grafik orde satu dan orde dua dapat dilihat dari nilai R^2 , yaitu koefisien kuadrat korelasi yang merupakan indikator model kinetika yang baik [11].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Tegangan dan Waktu Terhadap Proses Elektrokoagulasi

Efisiensi penurunan thorium pada variasi tegangan (Gambar 4) pada tegangan 12,5V dan 15V menunjukkan hasil efisiensi proses elektrokoagulasi yang berdekatan, yaitu 97,45 % dan 98,18 % sedangkan pada 10V menghasilkan efisiensi rendah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tegangan 10V suplai tegangan dalam pembentukan $Al(OH)_3$ kurang sehingga proses elektrokoagulasi kurang efektif. Selain itu kemungkinan pada saat proses elektrokoagulasi tegangan 10V elektrode anode mengalami *passivation* atau disebut juga terbentuknya lapisan Al_2O_3 pada elektrode anode karena pada saat itu arus yang dihasilkan sangat kecil, yaitu 2,16A sementara pada saat 12,5V arus mencapai 5,25A.



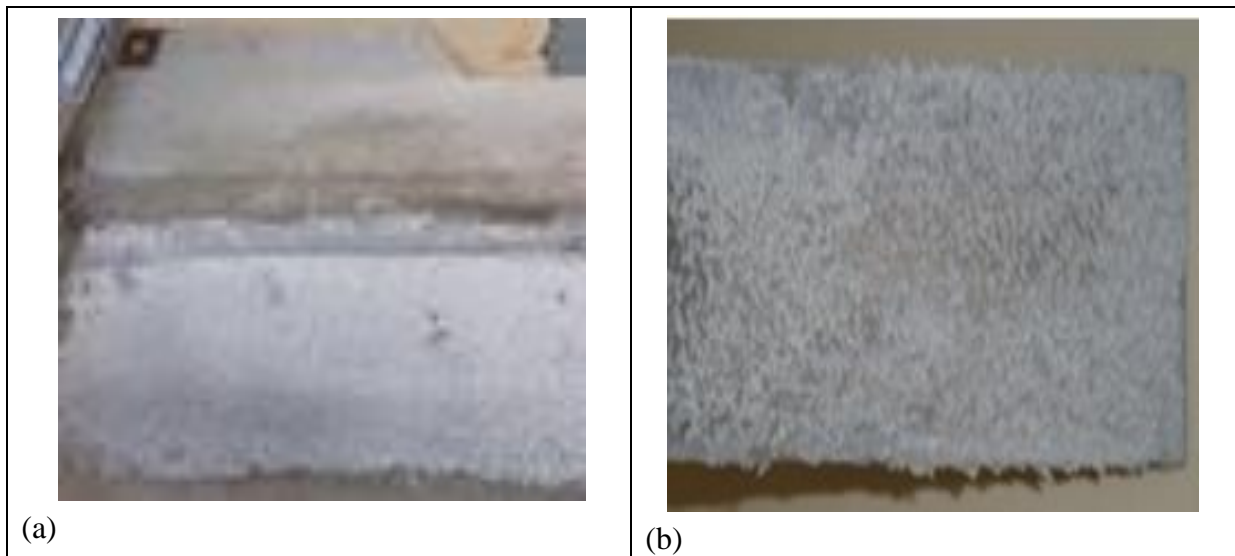
Gambar 4. Kurva waktu elektrokoagulasi vs efisiensi penurunan thorium variasi tegangan.

Tabel 1. Data efisiensi penurunan thorium variasi tegangan.

Waktu	Efisiensi Penurunan Thorium		
	10 V	12,5V	15V
10	0,000	0,000	0,000
20	51,423	92,611	95,700
30	54,210	93,277	96,850
40	61,962	95,076	97,396
50	65,536	95,609	96,850
60	67,898	96,051	98,062

Terbentuknya lapisan Al_2O_3 pada anode ditandai dengan terbentuknya lapisan tipis berwarna putih pada elektrode anode setelah proses (Gambar 5). Lapisan Al_2O_3 pada anode akan membuat reaksi oksidasi pada anode terhambat. Lapisan tersebut mencegah pelarutan logam dan transfer elektron pada anode sehingga ion Al^{3+} yang dihasilkan di anode berkurang yang berdampak efisiensi proses elektrokoagulasi menurun [12,13,14].

Untuk pengaruh waktu dapat diketahui bahwa efisiensi tertinggi pada proses elektrokoagulasi thorium dicapai pada waktu 30 menit (Tabel 1). Hal ini terjadi karena semakin lama waktu maka alumunium yang terlarut semakin banyak sehingga pembentukan $Al(OH)_3$ dalam proses akan semakin meningkat yang menyebabkan jumlah kompleks yang mengikat kontaminan semakin banyak dan efisiensi penurunan kontaminan semakin baik. Karena terjadi kejenuhan pada plat elektrode ketika tegangan dialirkan ke dalam larutan sehingga proses elektrokoagulasi berjalan secara terus-menerus memungkinkan jumlah flok $Al(OH)_3$ pun semakin bertambah. Jumlah flok yang semakin bertambah membuat sebagian flok menutupi plat elektrode yang akan menghalangi kemampuan elektrode dalam menarik ion dalam limbah sehingga terjadi penurunan besarnya kuat medan yang berakibat terjadi penurunan efisiensi proses elektrokoagulasi [15,16].



Gambar 5. Perbandingan pembentukan lapisan Al_2O_3 pada elektrode anode; (a) hasil penelitian (b) hasil referensi [20].

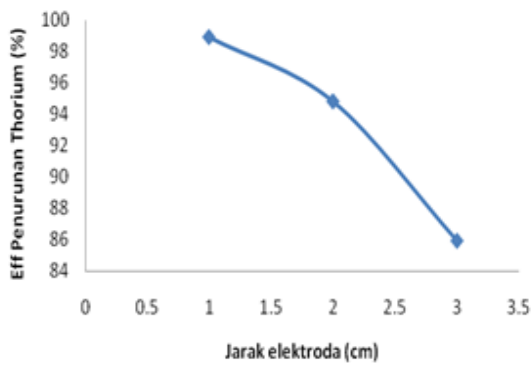
Waktu yang digunakan pada proses elektrokoagulasi thorium efisiensi tertinggi pada waktu 30 menit. Hal ini terjadi kemungkinan disebabkan karena nilai hasil kali kelarutan (Ksp) thorium, yaitu 4×10^{-45} untuk thorium. Nilai Ksp yang rendah mengindikasikan bahwa senyawa tersebut mudah diendapkan. Sebaliknya jika Ksp lebih tinggi lebih sukar diendapkan [17]. Nilai Ksp yang lebih besar membuat pemindahan kontaminan dalam limbah secara elektrokoagulasi berjalan lebih lambat [18] sehingga untuk polutan thorium membutuhkan waktu 30 menit.

Pengaruh Jarak Elektrode Terhadap Proses Elektrokoagulasi

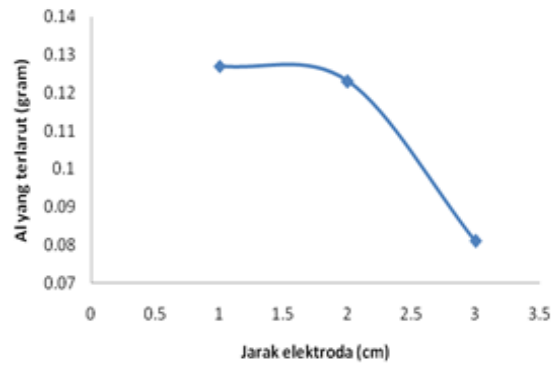
Untuk mengetahui pengaruh jarak elektrode terhadap efisiensi penurunan kontaminan thorium dalam limbah cair dengan proses elektrokoagulasi pada penelitian ini digunakan variasi jarak elektrode 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Efisiensi penurunan thorium (Gambar 6) menunjukkan pada saat jarak elektrode 1 cm dimana efisiensi thorium sebesar 98,9%. Pada jarak elektrode 2 cm diperoleh efisiensi penurunan

thorium sebesar 94,8%. Pada jarak 3 cm diperoleh efisiensi penurunan thorium sebesar 85,9%.

Dari percobaan untuk limbah thorium dapat diketahui bahwa thorium untuk variasi jarak elektrode mempunyai kecenderungan yang sama, yakni efisiensi tertinggi dicapai pada saat jarak elektrode 1 cm, diikuti dengan 2 cm, dan yang paling rendah pada jarak elektrode 3 cm. Hal ini terjadi karena semakin jauh jarak antar electrode, hambatan akan semakin besar sehingga produksi koagulan dalam hal ini $\text{Al}(\text{OH})_3$ juga akan berkurang yang menyebabkan efisiensi penurunan kontaminan berkurang. Efisiensi penurunan kontaminan meningkat seiring semakin pendeknya jarak elektrode. Jarak yang pendek antar elektrode anode dan katode dapat mengurangi hambatan ion dalam transportasinya [7,19].



Gambar 6. Kurva hubungan jarak elektrode vs efisiensi penurunan thorium.

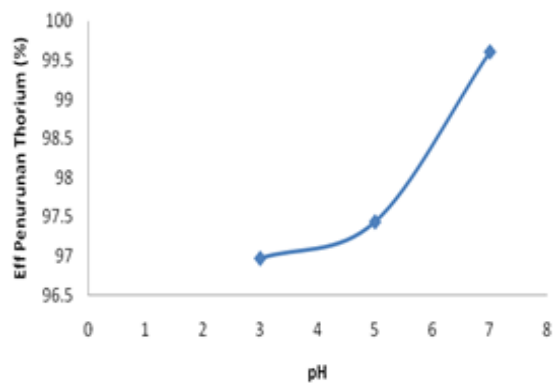


Gambar 7. Kurva hubungan jarak elektrode dengan Al yang terlarut pada proses elektrokoagulasi thorium.

Jarak elektrode akan mempengaruhi besarnya hambatan elektrolit. Semakin besar jarak semakin besar hambatannya sehingga arus yang mengalir semakin kecil. Hal ini ditunjukkan pada tegangan yang sama saat jarak elektrode 1 cm arus mencapai 2,43 ampere, untuk jarak elektrode 2 cm arus sebesar 1,88 ampere, jarak elektrode 3 cm arus sebesar 1,67 ampere. Arus kecil menyebabkan pembentukan Al^{3+} menjadi kecil sehingga polutan yang diendapkan sedikit. Pembentukan Al^{3+} dapat diketahui dari hasil perhitungan berdasarkan hukum Faraday, yaitu lewatnya arus 1F mengakibatkan oksidasi 1 massa ekuivalen suatu zat pada suatu elektrode (anode). Hasil perhitungan aluminium yang terlarut dengan variasi jarak elektrode ditunjukkan dalam Gambar 7.

Pengaruh pH Limbah Awal Terhadap Efisiensi Penurunan Thorium

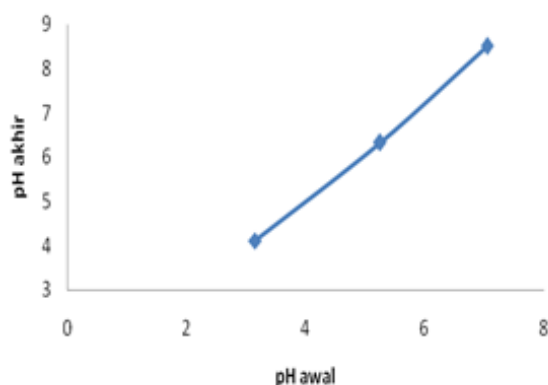
Parameter yang diamati pada proses elektrokoagulasi pada penelitian ini adalah variasi pH awal limbah cair yang diolah. Variasi pH yang digunakan adalah pH 3, 5, dan 7. Semakin tinggi pH efisiensi penurunan polutan dalam limbah semakin baik (Gambar 8).



Gambar 8. Kurva hubungan pH dengan efisiensi penurunan thorium.

Kecenderungan yang sama (Gambar 8) pH 7 mempunyai efisiensi terbaik, yaitu sebesar 99,6 %. Efisiensi pH 5 sebesar 97,4% dan pada pH 3 sebesar 96,9%. Nilai pH awal larutan mempengaruhi pembentukan ion hidroksida pada katode [18] saat pH 7 pembentukan ion hidroksida meningkat dan diikuti dengan pembentukan koagulan yang juga meningkat sehingga efisiensi penurunan thorium meningkat. Pada pH rendah pembentukan spesies aluminium pada proses elektrokoagulasi didominasi Al^{3+} dan $Al(OH)^{2+}$ sehingga pembentukan $Al(OH)_3$ kurang efektif. Namun dari penelitian ini selisih efisiensi dari variasi pH 3–7 tidak signifikan karena pada pH 3–9 produksi ion hidroksil akibat reduksi air pada elektrode katode meningkat [20]. Pada proses elektrokoagulasi terjadi oksidasi elektrode anode juga terbentuk hidrogen pada katode,

ion aluminium yang terlepas berinteraksi membentuk kompleks hidroksida yang dipengaruhi oleh pH air limbah. Selain itu, proses elektrokoagulasi juga meningkatkan nilai pH akhir proses (Gambar 9). Hal ini terjadi karena proses simultan dari proses tersebut yang menghasilkan ion hidroksil dalam larutan limbah sehingga pH akhir proses meningkat [21–23]. Besaran pH hasil proses elektrokoagulasi masih memenuhi baku mutu limbah cair, yaitu 6–9 sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 tentang baku mutu air limbah [24].



Gambar 9. Kurva hubungan pH awal dan pH akhir proses elektrokoagulasi limbahthorium.

Kinetika Dengan Cara Integral

Analisis data memperkirakan nilai konstanta kecepatan reaksi penurunan kontaminan thorium diawali dengan memilih persamaan tertentu untuk diuji dengan cara integral melalui metode-metode grafik dengan membandingkan kurva orde satu dan orde dua yang dapat dilihat dari nilai R^2 , yaitu koefisien kuadrat korelasi yang merupakan indikator model kinetika yang baik [11].

Hasil penelitian sebelumnya yang mempelajari kinetika terkait orde reaksi proses elektrokoagulasi dalam pemindahan

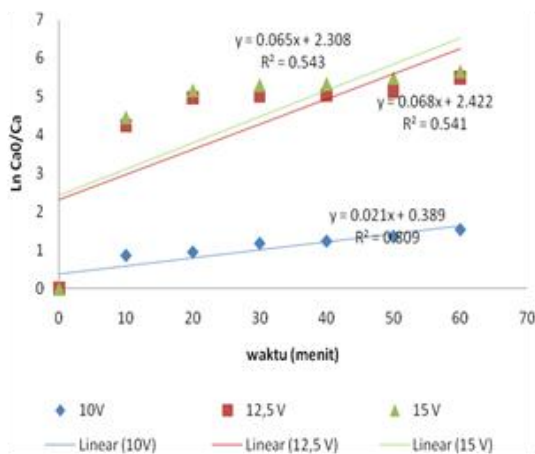
kontaminan diantaranya penelitian penurunan COD pada limbah tekstil dengan proses elektrokoagulasi merupakan orde satu [9]. Akan tetapi, beberapa penelitian juga menyatakan bahwa proses elektrokoagulasi pemindahan kontaminan merupakan reaksi orde dua, diantaranya studi kinetika pemindahan stronsium dan cesium dalam limbah cair merupakan reaksi orde dua [7] dan studi kinetika pemindahan total organik karbon pada limbah litografi merupakan reaksi orde 2 [8]. Berdasarkan pertimbangan penelitian-penelitian di atas, penulis memperkirakan nilai konstanta reaksi dari penurunan thorium dengan proses elektrokoagulasi merupakan orde satu atau dua.

Jika kita menganggap bahwa reaksi antara $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terbentuk dari proses elektrokoagulasi bereaksi dengan kontaminan thorium nitrat itu orde satu maka dapat diasumsikan bahwa $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terbentuk dan bereaksi dengan kontaminan tetap atau konstan sehingga dari persamaan kecepatannya adalah dapat dilihat pada persamaan (7) sampai (15) [10].

Pengujian model kinetika dengan metode grafik dari persamaan (9) untuk orde satu dan persamaan (15) untuk orde dua, serta dilinierkan dapat diketahui hasil percobaan dengan variasi tegangan (Gambar 10 dan 11).

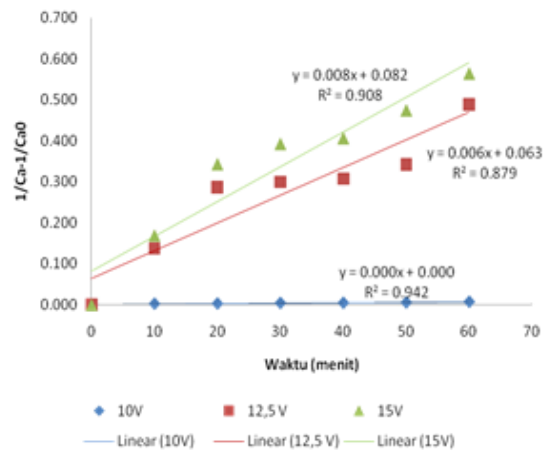
Dengan menggunakan model regresi dari Tabel 2 nampak regresi yang mendekati konstan pada unsur thorium adalah orde dua sehingga bisa diprediksi bahwa penurunan kontaminan thorium dengan proses elektrokoagulasi adalah mengikuti orde 2 dengan nilai k thorium = $0,0002 - 0,008 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Prediksi nilai konstanta kecepatan reaksi pemindahan thorium dengan proses elektrokoagulasi dengan pengaruh tegangan mempunyai nilai k rata-rata adalah 0,005

ppm⁻¹min⁻¹. Prediksi penentuan konstanta reaksi dapat dilihat dari nilai R² dengan nilai yang saling mendekati dan seragam [11]. Prediksi penurunan thorium dengan proses elektrokoagulasi mengikuti orde dua mempunyai kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian sebelumnya. Kebanyakan penelitian yang menggunakan proses elektrokoagulasi mengikuti orde dua



Gambar 10. Kurva proses elektrokoagulasi thorium orde satu.

[25], diantaranya studi kinetika pemindahan stronsium dan cesium dalam limbah cair merupakan reaksi orde dua[7], mempelajari kinetika pemindahan total organik karbon pada limbah litografi merupakan reaksi orde dua[8], dan pemindahan partikel pada pengolahan limbah polishing mekanik kimia (CMP) dengan elektrokoagulasi [26].



Gambar 11. Kurva proses elektrokoagulasi thorium orde dua.

Tabel 2. Perkiraan nilai konstanta reaksi orde satu dan orde dua.

Unsur	Tegangan (V)	Model Orde 1 -dC/dt = k ₁ C k ₁ (min ⁻¹)	R ²	Model Orde 2 -dC/dt = k ₂ C ² k ₂ (ppm ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
Thorium	10,0	0,021	0,809	0,0002	0,942
	12,5	0,068	0,541	0,0060	0,879
	15,0	0,065	0,543	0,0080	0,908

KESIMPULAN

Kondisi optimum dicapai pada saat tegangan 12,5V, jarak elektrode 1 cm, pH inlet 7, waktu 30 menit untuk thorium dengan nilai efisiensi sebesar 99,6%. Perkiraan nilai konstanta laju penurunan thorium adalah = 0,0002 – 0,008 ppm⁻¹min⁻¹, reaksi mengikuti orde dua. Prediksi nilai konstanta kecepatan reaksi pemindahan dengan pengaruh tegangan mempunyai nilai k rata-rata adalah 0,005 ppm⁻¹min⁻¹.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada DIPA PSTA tahun anggaran 2015–2016, yang telah memberikan dana untuk kegiatan litbang pengelolaan limbah. Bapak Imam Prayogo, ST dan Triyono, ST yang telah membantu dalam rancangan dan pembuatan alat elektrokoagulator yang digunakan untuk litbang pengolahan limbah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BBC, "Electrolysis," 2016. [Online]. Available: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/triple_ocr_gateway/chemistry_out_there/electrolysis/revision/2/. [Accessed: 10-Feb-2016].
- [2] A. Lukismanto dan A. F. Assomadi, *Aplikasi Elektrokoagulasi Pasangan Elektrode Besi untuk Pengolahan Air dengan Sistem Kontinyu*, Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya, 2007.
- [3] A. P. Kristijarti, I. Suharto, dan Marienna, *Penentuan Jenis Koagulan dan Dosis Optimum untuk Meningkatkan Efisiensi Sedimentasi dalam Instalasi Pengolahan air Limbah*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Bandung, 2013.
- [4] P. Gebbie, "A Dummy's Guide to Coagulants", *68th Annual Water Industry Engineers and Operators*, Conference Schweppes Centre, Bendigo, 2005.
- [5] P. Wulan, Dianursanti, M. Gozan, W. A. Nugroho, "Optimasi Penggunaan Koagulan pada Pengolahan Air Limbah Batubara", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia*, Yogyakarta, ISSN 1693-4393, 2010.
- [6] A. Setiawan, O. V. Sari, dan Bunawan, "Penentuan Konsentrasi Uranium dalam Air Minum dalam Kemasan (AMDK) Menggunakan Metode Jejak Fisi", *Prosiding PPI-PDIPTN-BATAN*, Yogyakarta, ISSN 0216-3128, 2017.
- [7] R. Kamaraj and R. Vasudevan, "Evaluation of Electrocoagulation Process for the Removal of Strontium and Cesium from Aqueous Solution", *Chemical Engineering Research and Design* 93, Elsevier 522-530, 2015.
- [8] A. S. Eskobar, A. P. Mateus, A. L. Vasquez, *Electrocoagulation-Photocatalytic Process for the Treatment of Lithographic Wastewater Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Kinetic Study*, Catalysis Today, Colombia, 2015.
- [9] L. Riadi, W. Ferydhiwati, dan L. Loeman, "Pengolahan Primer Limbah Tekstil dengan Elektrokoagulasi dan Analisis Biaya Operasi", *Reaktor*, Vol. 15, No 2, pp. 73-78, Surabaya, 2014.
- [10] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering Third Edition*, Department of Chemical Engineering Oregon State University, New York, 1999.
- [11] M. Al-Shannag, Z. Al-Qodah, K. B. Melhem, M. R. Qtaishat, and M. Alkasrawi, "Heavy Metal Ions Removal from Metal Plating Waste Water Using Electrocoagulation", *chemical engineering Journal*, 260, 749-756, Elsevier, 2015.
- [12] P. Holt, G. Barton, and C. Mitchel, "The Future for Electrocoagulation as a Localised Water Treatment Technology", *Chemosphere* 59, page 355-367, Australia, 2005.
- [13] A. Guzman, J. Nava, O. Coreno, I. Rodriguez, and S. Gutierrez, "Arsenic and Fluoride Removal from Groundwater by Electrocoagulation Using Continuous Filter-Press Reactor", *Chemosphere* 144, 2113-2120, Elsevier, 2016.
- [14] Prayitno, V. Ridantami, dan I. Prayogo, "Reduksi Aktivitas Uranium dalam Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Proses Elektrokoagulasi", *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA*, Volume 22, No. 3, pp 189-202, p ISSN 0852-4777; e ISSN 2528-0473.
- [15] Siringo-ringo, A. Kusrijadi, dan Y. Sunarya, "Penggunaan Metode Elektrokoagulasi Pada Pengolahan Limbah Industri Penyamakan Kulit Menggunakan aluminium sebagai Sacrificial Elektrode", *Jurnal Sains dan Teknologi Kimia*, Volume 4, No. 2, pp. 96-107, ISSN 2087-7412, Bandung, 2013.
- [16] N. C. Wahyulis dan I. Ulfin, "Optimasi Tegangan pada Proses Elektrokoagulasi Penurunan kadar kromium dari filtrat Hasil Hidrolisis limbah Padat Penyamakan Kulit", *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, Vol. 3, No. 2, pp. 2337-3520, Surabaya, 2014.
- [17] M. Anggraini, B. Saroni, S. Waluyo, Rusydi, dan Sujono, "Pengendalian Uranium dan Thorium hasil pelarutan slag II", *Eksplorium*, volume 36, No 2, pp. 125-132, 2015.
- [18] E. Gatsios, J. N. Haladakis, and E. Gidaracos, "Optimization of Electrocoagulation Process for the Purification of a Real Industrial Wastewater from Toxic Metals" *Journal of Environmental Management*, 154, pp. 117-127, Greece, 2015.
- [19] E. H. Ezechi, M. H. Isa, S. R. Kutty, and A. Yaqub, "Boron removal from produced water using electrocoagulation", *Process safety and Environmental Protection* 92, pp. 509-514, Malaysia, 2014.
- [20] A. Attour, M. Touati, M. Tlili, M. Amor, F. Lapique, and P. Leclerc, "Influence of Operating Parameters on Phosphate Removal from Water by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes", *Separation and Purification Technology* 123, pp. 124-129, Elsevier, 2014.
- [21] M. Kobya and E. Demirbas, "Evaluation of Operating Parameters on Treatment of can Manufacturing Wastewater by Electrocoagulation", *Journal of Water Process Engineering* 8, pp. 64-74, 2015.
- [22] T. Harif, M. Khai, and A. Adin, "Electrocoagulation versus Chemical Coagulation: coagulation/flocculation mechanisms and resulting flog characteristics" *Water Research* 46, pp. 3177-3188, Elsevier, 2012.
- [23] F. Hanum, R. Tambun, Y. M. Ritonga, W. W. Kasim, "Aplikasi Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit", *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sumatera Utara*, Vol. 4, No 4, Medan, 2015.

- [24] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
- [25] P. Aswanty, R. Gandhimathi, S. T. Ramesh, and P. V. Nidhesh, *Removal of Organics from Bilge Water by Batch Electrocoagulation Process*, Separation and Purification Technology, Elsevier, India, 2016.
- [26] L. Hung, C. Lin, J. Huang, and S. Yen, "Particle removal performance and its kinetic behavior during oxide-CMP wastewater treatment by electrocoagulation", *Journal of The Taiwan of Chemical Engineers*, pp. 1-5, Taiwan, 2015.