



**Proses Elektrokoagulasi untuk Menurunkan Kadar Thorium
dalam Limbah Hasil Pengolahan Logam Tanah Jarang**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Kimia

oleh

Indah Muji Mulyani

4311413071

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

JURUSAN KIMIA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2017

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, Oktober 2017



Indah Muji Mulyani

4311413071



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Proses Elektrokoagulasi untuk Menurunkan Kadar Thorium dalam Limbah Hasil
Pengolahan Logam Tanah Jarang

disusun oleh

Indah Muji Mulyani

4311413071

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA Unnes pada tanggal 2
Oktober 2017



Prof. Dr. Zaenuri S.E., M.Si., Akt

NIP. 19641223 198803 1 001

Sekretaris

Dr. Nanik Wijayati, M.Si.

NIP. 19691023 199603 2 002

Ketua Penguji

Agung Tri Prasetya, S.Si, M.Si

NIP. 19690404 199402 1 001

Anggota Penguji/
Pembimbing I

Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si

NIP. 19691217 199702 2 001

Anggota Penguji/
Pembimbing II

Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si

NIP. 19821214 200912 2 004

MOTTO

Berkat kerja keras dan keyakinan kita bisa membuat sesuatu yang tidak mungkin menjadi mungkin



PERSEMBAHAN

Untuk Bunda, Ayah, Kakak Amelya, Eyang,

Teman-teman dan Hariman Rilo Pambudi

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Prakata

Puji syukur kepada Allah Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulisan skripsi yang berjudul “Proses Elektrokoagulasi untuk Menurunkan Kadar Thorium dalam Limbah Hasil Pengolahan Logam Tanah Jarang” ini bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum dalam proses elektrokoagulasi yang meliputi jenis plat elektroda, tegangan dan waktu kontak agar diperoleh metode pengolahan limbah cair yang mengandung radioaktif secara efektif dan efisien.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dan mendorong demi terselesaikannya skripsi ini, diantaranya kepada:

1. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang,
2. Ketua jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang,
3. Bapak Agung Tri Prasetya, S.Si, M.Si (Penguji di UNNES),
4. Ibu Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si (Pembimbing 1 di UNNES),
5. Ibu Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si (Pembimbing 2 di UNNES),
6. Kepala PSTA-BATAN Yogyakarta,
7. Kepala Bidang Keselamatan Kerja dan Keteknikan PSTA-BATAN Yogyakarta,
8. Bapak Ir. Prayitno, M.T (Pembimbing di PSTA-BATAN Yogyakarta),
9. Bapak Imam Prayogo, S.T dan Ibu Vemi Ridantami, A.Md (Pembimbing lapangan di PSTA-BATAN Yogyakarta),
10. Bapak Tri Suyatno, Bapak Endro Kismolo, S.T, Bapak Ir. Gede Sutresna, M.Eng, Bapak Sunardi, S.S.T, Bapak Wasim Yuwono dan Ibu Nurimanywathy,
11. Seluruh staff dan karyawan Universitas Negeri Semarang,
12. Seluruh staff dan karyawan PSTA-BATAN Yogyakarta.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang ada dalam skripsi ini. Kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat dibutuhkan guna perbaikan skripsi atau karya-karya penulis selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Semarang, Oktober 2017

Penulis

ABSTRAK

Mulyani, Indah Muji. 2017. *Proses Elektrokoagulasi untuk Menurunkan Kadar Thorium dalam Limbah Hasil Pengolahan Logam Tanah Jarang*. Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Pembimbing Utama Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si., Pembimbing Pendamping Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si. dan Pembimbing PSTA-BATAN Yogyakarta Ir. Prayitno, M.Eng.

Kata Kunci: proses elektrokoagulasi, thorium, logam tanah jarang

Proses pengolahan logam tanah jarang menimbulkan limbah yang mengandung pengotor seperti unsur radioaktif thorium. Limbah yang mengandung thorium berbahaya untuk pernapasan atau beresiko kanker paru-paru dan leukimia jika tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jenis plat elektroda, tegangan dan waktu kontak yang dibutuhkan untuk mengurangi kandungan thorium secara optimum dan efektif dengan melihat besar konsumsi elektroda dan energi yang digunakan dalam prosesnya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu proses elektrokoagulasi dengan variasi jenis plat (berturut-turut dengan susunan katoda-anoda yaitu alumunium-alumunium, alumunium-tembaga, tembaga-alumunium dan tembaga-tembaga), tegangan (1, 2 dan 3 V) dan waktu kontak selama 60 menit. Parameter lain yang juga diukur yaitu kuat arus, pH, suhu, berat elektroda sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi, konsumsi elektroda dan energi. Dari hasil penelitian diketahui bahwa jenis plat yang paling efektif yaitu Al-Al dengan efisiensi penyisihan sebesar 98,06% pada waktu 5 menit dengan besar konsumsi elektroda dan energi berturut-turut sebesar $5,95 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ dan $117,20 \text{ kWh/m}^3$, serta tegangan yang dibutuhkan untuk proses elektokoagulasi secara optimum yaitu 2 V.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ABSTRACT

Mulyani, Indah Muji. 2017. Electrocoagulation Process for Reducing Thorium in Waste by Processing Rare Earth Metals. Thesis, Chemistry Department Faculty of Mathematics and Natural Sciences. Supervisor Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si., Co-Supervisor Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si. and Supervisor of PSTA-BATAN Yogyakarta Ir. Prayitno, M.Eng.

Keyword: electrocoagulation process, thorium, rare earth metal

Processing of rare earth metals will cause waste containing impurities such as radioactive compounds thorium. Waste containing thorium is harmful for respiration or at risk of lung cancer and leukemia if not managed properly. It aims to determine the effective electrode plate type, voltage and contact time required to reduce thorium content optimally and effectively by looking at the large consumption of electrodes and the energy used in the process. The method used in this research is electrocoagulation process with variable of plate type variation (successively with anode-cathode-aluminium, aluminum-copper, copper-aluminum and copper-copper), voltage (1, 2 and 3 V) and contact time for 60 minutes. The other parameters also measured are the current strength, pH, temperature, weight of the electrode in the electrocoagulation process and consumption of electrodes and energy. From the result of research, it is known that the most effective type of plate is Al-Al with efficiency of removal equal to 98.06% at 5 minutes with big consumption of electrode and energy are $5.95 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ and 117.20 KWh/m³., and the voltage required for the electroagulation process is optimum 2 V.



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB	
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	7
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Logam Tanah Jarang	8
2.2 Limbah Radioaktif Thorium	12
2.2.1 Limbah Radioaktif	12
2.2.2 Thorium	15
2.3 Penanganan Limbah Radioaktif	17
2.4 Elektrokoagulasi	18
2.4.1 Hukum Faraday	21

2.4.2 Reaksi Kimia yang Terjadi Pada Elektroda	22
2.4.3 Parameter Proses Elektrokoagulasi	28
2.4.4 Efisiensi Penyisihan	36
2.4.5 Konsumsi Energi dan Elektroda	36
2.5 Spektrofotometer UV-Vis	37
2.6 Analisis Radioaktivitas	43
3. METODE PENELITIAN	
3.1 Lokasi Penelitian	44
3.2 Sampel	44
3.3 Variabel Penelitian	45
3.3.1 Variabel Bebas	45
3.3.2 Variabel Terikat	45
3.3.3 Variabel Terkendali	45
3.4 Alat	46
3.5 Bahan	46
3.6 Cara Kerja	47
3.6.1 Penentuan Panjang Gelombang Optimum	47
3.6.2 Pembuatan Kurva Kalibrasi Standar Thorium	48
3.6.3 Penentuan Konsentrasi dan pH Limbah Cair Radioaktif Thorium	48
3.6.4 Proses elektrokoagulasi	49
3.6.5 Analisis Endapan Hasil Proses Elektrokoagulasi	53
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Penentuan Panjang Gelombang Optimum Thorium Arsenazo	54
4.2 Kurva Kalibrasi Standar	55
4.3 Penentuan Konsentrasi dan pH Limbah Cair Radioaktif Thorium	55
4.4 Proses Elektrokoagulasi	56

4.4.1 Variasi Jenis Plat Elektroda	56
4.4.2 Variasi Tegangan Menggunakan Plat Al-Al	83
4.4.3 Variasi Waktu Kontak Menggunakan Plat Al-Al Pada Tegangan 2 V	87
4.4.4 Hasil Analisis Berat Elektroda (Al-Al, Al-Cu, Cu-Al dan Cu-Cu)	89
5. PENUTUP	
5.1 Simpulan	93
5.2 Saran	93
DAFTAR PUSTAKA	94
LAMPIRAN	101



DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Kandungan Uranium dan Thorium dalam Mineral Logam Tanah Jarang	11
2.2 Isotop Thorium	16
2.3 Reaksi Anoda Alumunium dan Tembaga	26
2.4 Warna Pancaran Sinar Tampak	41
3.1 Variasi Susunan Plat Anoda Katoda	50
4.1 Potensial Sel Variasi Jenis Plat	76
4.2 Hambatan Pada Proses Elektrokoagulasi Variasi Jenis Plat	79
4.3 Hasil Pencacahan Sampel Endapan Hasil Proses Elektrokoagulasi	80
4.4 Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Al Pada Tegangan 1 V	90



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Contoh Mineral Logam Tanah Jarang, Kasiterit (SnO_2) dan Mineral Pengikutnya	9
2.2 Deret Thorium	16
2.3 Logam Thorium	17
2.4 Skema Proses Elektrokoagulasi	20
2.5 Pembentukan Kompleks Permukaan untuk Penghilangan Ion	25
2.6 Mekanisme Proses Koagulasi	27
2.7 Mekanisme Proses Flokulasi	28
2.8 Mekanisme Proses Elektrokoagulasi	29
2.9 Distribusi Spesies Hidrolisis Alumunium Berdasar pH	32
2.10 Diagram Kelarutan Alumunium Hidroksida $\text{Al}(\text{OH})_3$ Berdasarkan Spesies Mononuklir Al	33
2.11 Diagram Kelarutan Tembaga Hidroksida	34
2.12 Peta Kondisi Tembaga Oksida	34
2.13 Konsentrasi Ion Logam Bebas Dalam Keseimbangan dengan Padatan Oksida atau Hidroksida	34
2.14 Struktur Molekul Arsenazo III	39
3.1 Rangkaian Alat Elektrokoagulasi	52
4.1 <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Thorium Konsentrasi 20, 40, 60, 80 dan 100 ppm	54
4.2 Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Al	57
4.3 pH Pada Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Al-Al	58
4.4 Mekanisme Reaksi Pembentukan Koagulan	62
4.5 Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Cu	64
4.6 pH Pada Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Al-Cu	65
4.7 Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Al	68

4.8	pH Pada Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Cu-Al	69
4.9	Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Cu	71
4.10	pH Pada Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Cu-Cu	72
4.11	Suhu Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	74
4.12	Tegangan Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	75
4.13	Kuat Arus Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	78
4.14	Konsumsi Elektroda Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	81
4.15	Konsumsi Energi Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	81
4.16	Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan dengan Plat Al-Al	83
4.17	Tegangan Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan dengan Plat Al-Al	84
4.18	Kuat Arus Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan dengan Plat Al-Al	85
4.19	Konsumsi Elektroda Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan dengan Plat Al-Al	86
4.20	Konsumsi Energi Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan dengan Plat Al-Al	86
4.21	Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Waktu Kontak dengan Plat Al-Al Tegangan 2 V	87
4.22	Pengaruh Jenis Plat dan Tegangan Pada Berat Logam yang Terlarut	90

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Tabel Periodik Jari – Jari Atom Dalam Angstrom	101
2. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 10 ppm	102
3. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 20 ppm	103
4. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 30 ppm	104
5. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 40 ppm	105
6. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 50 ppm	106
7. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 70 ppm	107
8. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 90 ppm	108
9. <i>Scanning</i> Hasil Spektrum Larutan Standar Konsentrasi 100 ppm	109
10. Tabel Hasil Pengukuran Larutan Thorium Standar	110
11. Tabel Kurva Kalibrasi Thorium Standar	110
12. Tabel Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Al	111
13. Tabel Hubungan pH Terhadap Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Al-Al	112
14. Tabel Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Cu	113
15. Tabel Hubungan pH Terhadap Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Al-Cu	114
16. Tabel Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Al	115
17. Tabel Hubungan pH Terhadap Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Cu-Al	116
18. Tabel Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Cu	117
19. Tabel Hubungan pH Terhadap Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi dengan Plat Cu-Cu	118
20. Tabel Suhu Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	119
21. Tabel Tegangan Pada Proses Elektrokoagulasi	120

22. Tabel Kuat Arus Pada Proses Elektrokoagulasi	121
23. Tabel Konsumsi Elektroda dan Energi Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Jenis Plat	122
24. Tabel Efisiensi Penyisihan Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan	123
25. Tabel Konsumsi Elektroda dan Energi Proses Elektrokoagulasi Pada Variasi Tegangan	124
26. Tabel Hasil Analisis Endapan Menggunakan XRF	125
27. Tabel Hasil Analisis Thorium dalam Endapan Menggunakan XRF	125
28. Tabel Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Al Pada Tegangan 1 V	126
29. Tabel Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Al Pada Tegangan 3 V	127
30. Tabel Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Al-Cu Pada Tegangan 2 V	128
31. Tabel Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Al Pada Tegangan 1 V	129
32. Tabel Berat Plat Sebelum dan Sesudah Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Plat Cu-Cu Pada Tegangan 2 V	130
33. Tabel Berat Elektroda yang Terlarut dalam Proses Elektrokoagulasi	131
34. Diagram Alir Pembuatan Larutan Induk Thorium	132
35. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 10 ppm	133
36. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 20 ppm	134
37. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 30 ppm	135
38. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 40 ppm	136
39. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 50 ppm	137
40. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 60 ppm	138
41. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 70 ppm	139
42. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 80 ppm	140
43. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 90 ppm	141
44. Diagram Alir Pembuatan Larutan Standar Thorium 100 ppm	142
45. Diagram Alir Penentuan Panjang Gelombang Optimum	143

46. Diagram Alir Pembuatan Kurva Kalibrasi Standar Thorium	143
47. Diagram Alir Karakterisasi Limbah Cair Radioaktif Thorium	144
48. Diagram Alir Proses Elektrokoagulasi Variasi Jenis Plat	145
49. Diagram Alir Proses Elektrokoagulasi Variasi Tegangan	146
50. Diagram Alir Proses Elektrokoagulasi Variasi Waktu Kontak	147
51. Pembuatan Larutan Induk Thorium 200 ppm dalam 100 mL	148
52. Pembuatan Larutan Standar Thorium 10 ppm dalam 25 mL	148
53. Pembuatan Larutan Standar Thorium 20 ppm dalam 25 mL	149
54. Pembuatan Larutan Standar Thorium 30 ppm dalam 25 mL	149
55. Pembuatan Larutan Standar Thorium 40 ppm dalam 25 mL	149
56. Pembuatan Larutan Standar Thorium 50 ppm dalam 25 mL	149
57. Pembuatan Larutan Standar Thorium 60 ppm dalam 25 mL	149
58. Pembuatan Larutan Standar Thorium 70 ppm dalam 25 mL	150
59. Pembuatan Larutan Standar Thorium 80 ppm dalam 25 mL	150
60. Pembuatan Larutan Standar Thorium 90 ppm dalam 25 mL	150
61. Pembuatan Larutan Standar Thorium 100 ppm dalam 25 mL	150
62. Pembuatan Larutan Arsenazo (III) 0,2 % dalam 100 mL	151
63. Pembuatan Larutan $H_2C_2O_4$ 0,1 N dalam 100 mL	151
64. Pembuatan Larutan NaOH 0,1 N dalam 100 mL	151
65. Pembuatan Larutan HNO_3 0,1 N dalam 100 mL	152
66. Pembuatan Larutan $Na_2CO_3 \cdot H_2O$ 0,1 N dalam 100 mL	152
67. Perhitungan Potensial Sel Proses Elektrokoagulasi Pada Plat Al-Al	152
68. Perhitungan Potensial Sel Proses Elektrokoagulasi Pada Plat Al-Cu	155
69. Perhitungan Potensial Sel Proses Elektrokoagulasi Pada Plat Cu-Al	157
70. Perhitungan Potensial Sel Proses Elektrokoagulasi Pada Plat Cu-Cu	158

71. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	159
72. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	160
73. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	161
74. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	162
75. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	163
76. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	164
77. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 3 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	165
78. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 3 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	166
79. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Al Tegangan 3 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	167
80. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	168
81. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	169
82. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Al-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	170
83. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Plat Cu-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	171
84. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Cu-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	172

85. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Plat Cu-Al Tegangan 1 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	173
86. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Katoda Proses Elektrokoagulasi Cu-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	174
87. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Tengah Katoda dan Anoda Proses Elektrokoagulasi Cu-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	175
88. <i>Scanning</i> Hasil Analisis Sampel di Sekitar Anoda Proses Elektrokoagulasi Cu-Cu Tegangan 2 V Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis	176
89. Lampiran Foto	177



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi pengolahan material, unsur tanah jarang semakin dibutuhkan. Logam Tanah Jarang (LTJ) atau dikenal dengan istilah *rare earth* merupakan salah satu sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (Saadah & Kusuma, 2014). Penggunaan logam tanah jarang sangat luas dan erat kaitannya dengan produk industri teknologi tinggi seperti industri komputer, telekomunikasi, nuklir dan ruang angkasa (Suprpto, 2008), katalis minyak bumi (Binnemans *et al.*, 2013), pemecah kompleks susunan kimia (*cracking*), metalurgi, keramik dan gelas, pengembangan magnet, listrik, dan penelitian lainnya (Herman, 2009). Potensi besar yang dapat dihasilkan dari komoditas unsur/logam tanah jarang menyebabkan terjadinya peningkatan ketersediaan bahan tersebut.

Sebagai komoditas perdagangan maka logam tanah jarang mempunyai nilai jual yang tinggi dibandingkan dengan logam yang lainnya. Produk logam tanah jarang harus memiliki kemurnian tinggi, bebas dari unsur radioaktif U, Th dan unsur pengotor lainnya seperti PO_4 , TiO_2 dan lain sebagainya (Suprpto, 2008).

Letak kesulitan dalam memperoleh logam tanah jarang murni adalah sulitnya memisahkan antara unsur-unsur lantanida yang satu dengan unsur yang lainnya, akibat dari sifat - sifatnya yang mirip, sehingga cara-cara kimia biasa sangat sukar diterapkan untuk pemisahan masing-masing unsur tersebut dalam keadaan murni. Metode-metode pemisahan yang telah banyak digunakan untuk memperoleh logam tanah jarang adalah



UNNES

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

dengan metode kristalisasi bertingkat, pengendapan bertingkat, ekstraksi pelarut, dan metode kromatografi kolom pertukaran ion (Amin, 2009), sehingga didapatkan logam tanah jarang yang murni dan terpisah dari unsur lain. Proses pemisahan tersebut akan menghasilkan limbah yang mengandung unsur-unsur lain yang telah dipisahkan dari logam tanah jarang, diantaranya limbah radioaktif dan unsur pengotor lainnya.

Limbah radioaktif adalah limbah yang mengandung sejumlah radionuklida-radionuklida dan dapat berbentuk padat, cair maupun gas. Limbah radioaktif mempunyai sifat berbahaya terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan bila tidak dikelola dengan baik. Limbah radioaktif yang dihasilkan dari pengolahan logam tanah jarang salah satunya yaitu thorium (Th).

Thorium terdapat pada beberapa mineral antara lain thorite (ThO_2), thorianite ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$), monasit ($(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})\text{PO}_4$), zirkon (ZrSiO_2), xenotim (YPO_4) dan alanit ($(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$) (Ngadenin *et al.*, 2014). Thorium merupakan salah satu senyawa radioaktif pemancar sinar alfa (Irianto *et al.*, 2012). Thorium berbahaya untuk pernapasan atau beresiko kanker paru-paru dan leukimia (Milanese *et al.*, 2016), sehingga perlu dikelola dengan baik.

Pengolahan limbah cair radioaktif secara umum dapat dilakukan dengan metode adsorpsi, vitrifikasi, imobilisasi, penambahan flokulan dan koagulan. Namun metode-metode tersebut masih kurang efektif. Misalnya pada metode imobilisasi limbah cair dengan cara mengungkung ke dalam bahan matriks *synroc*. Bahan matriks tersebut dibuat dari Al_2O_3 , BaO, CaO, ZrO_2 dan TiO_2 (Gunandjar *et al.*, 2016), sehingga tidak efektif. Selain itu, pada denitrifikasi limbah radioaktif cair yang mengandung asam nitrat dengan proses biooksidasi. Untuk menurunkan kadar uranium sebesar 817 Bq/l dari 25.000 ppm

dibutuhkan waktu proses 464 jam atau 19 hari (Salimin & Rachmadetin, 2010), sehingga tidak efektif karena dibutuhkan waktu proses yang lama.

Salah satu pengolahan limbah tanpa adanya penambahan bahan kimia yaitu proses elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi merupakan gabungan proses elektrokimia dan flokulasi-koagulasi. Proses ini berdasar pada elektrolisis dengan penggunaan elektroda yang dioksidasi membentuk ion logam yang berfungsi sebagai koagulan. Elektroda yang digunakan yaitu logam aluminium (Al), besi (Fe) atau logam lainnya. Berdasarkan Cerqueira & Marques (2012), elektrokoagulasi dalam penurunan polutan sangat bergantung pada ukuran gelembung atau flok, serta konsumsi energi yang berhubungan dengan desain sel elektrolisis, bahan elektroda, susunan elektroda dan kondisi operasi yang meliputi kerapatan kuat arus, konduktivitas *effluent* dan waktu elektrolisis.

Secara garis besar proses yang terjadi selama elektrokoagulasi dapat dijelaskan dalam 3 tahap antara lain yaitu (1) reaksi elektrolisis pada permukaan elektroda, (2) pembentukan koagulan dalam fasa larutan, dan (3) adsorpsi larutan atau pembentukan polutan menjadi koloid pada koagulan dan penghilangan dengan pengendapan atau pengapungan (Koby *et al.*, 2003).

Kelebihan proses elektrokoagulasi dari beberapa penelitian yaitu reaktivitas kimia tinggi seperti Mn^{2+} , OH^- dan radikal superoksida HO_2^- , volume *sludge* yang diproduksi rendah, pertukaran partikel koloid berukuran kecil, flotasi diinduksi untuk membawa polutan ke permukaan, pengurangan katodik dari polutan, migrasi elektroforesis ion dalam larutan, pengurangan ion logam di katoda (Lekhlif *et al.*, 2014), mudah dioperasikan, sedikit waktu retensi, tidak ada penambahan bahan kimia, sedimentasi cepat, peralatan yang digunakan sederhana (Akyol *et al.*, 2013), biaya operasional rendah dan bahan elektroda mudah didapat (Thirugnanasambandham *et al.*, 2013).

Proses elektrokoagulasi telah diaplikasikan seperti pada limbah cair pengeboran (Elnenay *et al.*, 2016) menggunakan elektroda aluminium (Al) dengan tegangan 40 V pada pH 7-9. Parameter dalam penelitian tersebut yaitu variasi waktu elektrolisis antara 5-45 menit, tegangan dari 0,008-0,034 A/cm². Hasil penelitian tersebut diantaranya untuk pengaruh waktu elektrolisis yaitu semakin lama waktu elektrolisis maka penurunan semakin tinggi yaitu COD 89% setelah 45 menit dan untuk pengaruh kuat tegangan yaitu semakin besar tegangan maka penurunan COD semakin meningkat yaitu 65%.

Beberapa penelitian lain yang telah menggunakan metode elektrokoagulasi yaitu untuk menurunkan konsentrasi nikel (Ni) dan kromium (Cr) pada limbah elektroplating (Lekhlif *et al.*, 2014), menurunkan Cr pada limbah industri sarung (Kartika *et al.*, 2015) dan filtrat hidrolisis limbah padat penyamakan kulit (Wahyulis *et al.*, 2014). Selain itu proses elektrokoagulasi digunakan pada pengolahan limbah *laundry* (Rachmawati *et al.*, 2014), menurunkan kadar arsen (As) pada air tanah (Kobyas *et al.*, 2014), pengolahan limbah cair industri minyak (Cerqueira & Marques, 2012), pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit (Hanum *et al.*, 2015), dan pengolahan air yang mengandung polutan yaitu partikel tersuspensi, logam-logam berat, produk minyak bumi, warna pada zat pewarna, larutan humus dan deflouridasi air (Trapsilasiwi & Assomadi, 2010), serta penelitian-penelitian lainnya.

Proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya pH, jenis plat elektroda, jarak antar elektroda, konduktivitas, kuat tegangan, suhu dan waktu kontak. Dalam penelitian ini, difokuskan pada parameter jenis plat elektroda, tegangan dan waktu kontak

Jenis plat elektroda berpengaruh secara signifikan terhadap hasil proses pengolahan (Cerqueira & Marques, 2012). Berdasar penelitian Kartika *et al.* (2015)

proses elektrokoagulasi untuk menurunkan kadar ion logam kromium (Cr) pada limbah industri sarung menggunakan elektroda alumunium (Al). Hasil yang didapat pada penurunan kadar Cr dalam limbah dengan variasi waktu kontak (120 menit dengan interval 30 menit), tegangan (4,5; 9 dan 12 V) dan jarak antar elektroda (1; 1,5 dan 2 cm) berturut-turut sebesar 38,302; 57,897 dan 64,610% (pada waktu kontak optimum 30 menit, tegangan optimum 4,5 V dan jarak antar elektroda optimum 1 cm).

Dilakukan pula penelitian oleh Rachmawati *et al.* (2014) proses elektrokoagulasi untuk mengolah limbah *laundry* menggunakan elektroda tembaga (Cu) dengan variasi waktu (60, 80, 100, 120 dan 140 menit) dan variasi tegangan (9, 12, 15, 18 dan 21 V). Parameter yang diukur dalam penelitian tersebut yaitu TSS (*Total Suspended Solid*) dan surfaktan. Dari hasil penelitian didapatkan hasil optimal untuk efisiensi penyisihan TSS yaitu 85% dari 400 mg/L menjadi 60 mg/L dengan tegangan 21 V dengan waktu *sampling* 140 menit dan efisiensi penyisihan surfaktan sebesar 60,36% dari 15,21 mg/L menjadi 6 mg/L.

Tegangan dan waktu kontak juga berpengaruh terhadap besar penurunan kadar suatu polutan dalam proses elektrokoagulasi. Menurut penelitian Kurniasih *et al.* (2016) menurunkan kadar logam besi (Fe) dan mangan (Mn) menggunakan elektroda alumunium (Al) dengan parameter variasi tegangan (3, 6, 9 dan 12 V) dan waktu kontak (30, 60, 90 dan 120 menit). Hasil penelitian menunjukkan bahwa, pada variasi tegangan dihasilkan penurunan Fe dan Mn berturut-turut sebesar 99,87% dan 95,90% (pada tegangan 12 V), sedang pada variasi waktu kontak dihasilkan penurunan kadar Fe dan Mn berturut-turut sebesar 99,57% dan 93,03% (pada waktu kontak 120 menit).

Pada penelitian ini dilakukan proses elektrokoagulasi untuk menurunkan konsentrasi thorium yang terkandung dalam limbah dari hasil pengolahan logam tanah

jarang di PSTA-BATAN Yogyakarta. Thorium dan komponennya sangat berbahaya bagi kesehatan dan keseimbangan ekosistem karena mengandung radioaktif (pemancar alfa) dan bersifat toksik (Li *et al.*, 2016). Dalam proses elektrokoagulasi dilakukan penentuan jenis plat elektroda, tegangan dan waktu kontak optimum pada proses elektrokoagulasi untuk menurunkan kadar thorium hasil pengolahan logam tanah jarang. Hal ini dilakukan agar dihasilkan proses yang tidak hanya efisien dalam menurunkan kadar limbah namun juga rendah konsumsi energi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh jenis plat elektroda (aluminium-aluminium, aluminium-tembaga, tembaga-aluminium dan tembaga-tembaga) untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan pada efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi
2. Berapa tegangan yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan pada efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi
3. Berapa waktu kontak yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan pada efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh jenis plat elektroda (aluminium-aluminium, aluminium-tembaga, tembaga-aluminium dan tembaga-tembaga) untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi.
2. Menentukan besar tegangan yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi.
3. Menentukan waktu kontak yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi secara optimum berdasarkan efisiensi penyisihan, konsumsi elektroda dan energi.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini yaitu memperoleh metode penyelesaian limbah radioaktif yang aman dan tidak mencemari lingkungan serta endapan thorium dapat dimanfaatkan kembali untuk proses sementasi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Tanah Jarang

Logam tanah jarang (*Rare Earth Metal*) dikenal sebagai lantanida dalam susunan berkala unsur-unsur, memiliki nomor atom antara 57 sampai 71 (Amin, 2009). Berdasarkan berat atomnya, logam tanah jarang digolongkan menjadi dua kelompok yaitu kelompok lantanida yang terdiri mulai europium (nomor atom 57 sampai 63) dan kelompok gadolinium yang terdiri dari lutetium (nomor atom 64 sampai 71). Yttrium (nomor atom 39) juga dimasukkan ke dalam kelompok unsur tanah jarang (Long *et al.*, 2010).

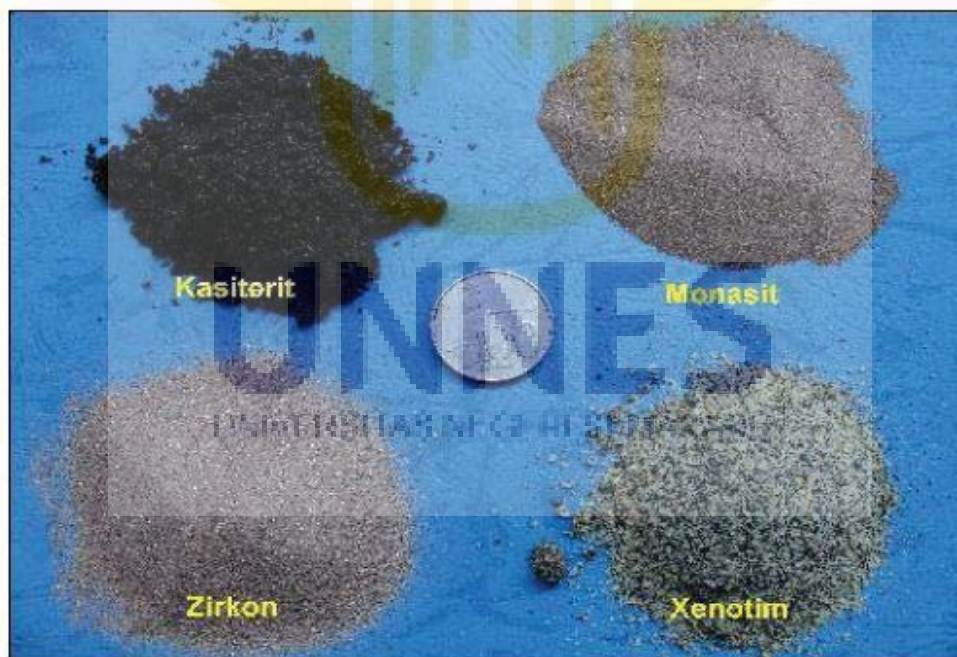
Logam tanah jarang terdapat sebagai mineral ikutan pada mineral utama seperti tembaga, emas, perak, timah dan lain-lain. Sebagai material ikutan dari mineral utama, jumlahnya sangat kecil dan jarang ditemukan, maka material atau elemen ini disebut logam tanah jarang atau disingkat LTJ (Atmawinata *et al.*, 2014).

Unsur tanah jarang mempunyai sifat reaktif tinggi terhadap air dan oksigen, bentuk senyawa stabil dalam kondisi oksida, titik leleh relatif tinggi, sebagai bahan penghantar panas yang tinggi (Suprpto, 2008) dan mempunyaiampang lintang serapan neutron yang besar sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang teknologi (Wasito & Biyantoro, 2009) seperti industri komputer, telekomunikasi, nuklir, ruang angkasa (Suprpto, 2008) dan lainnya.

Logam tanah jarang (LTJ) tidak ditemukan di bumi sebagai unsur bebas melainkan paduan berbentuk senyawa kompleks (Suprpto, 2008) atau gabungan dari sebagian

unsur-unsur tanah jarang tertentu (Herman, 2009). Untuk pemanfaatannya, logam tanah jarang harus dipisahkan terlebih dahulu dari senyawa kompleks tersebut (Suprpto, 2008). Pemisahan dilakukan berdasarkan sifat magnet dan sifat listrik mineral (Atmawinata *et al.*, 2014).

Logam Tanah Jarang bersifat tidak tergantikan. Hal ini disebabkan sifat logam tanah jarang yang sangat khas, sehingga sampai saat ini, tidak ada material lain yang mampu menggantikannya. Jika ada, kemampuan yang dihasilkan tidak sebaik material logam tanah jarang. Sifat logam tanah jarang yang digunakan sebagai material berteknologi tinggi dan belum ada penggantinya, membuat logam tanah jarang menjadi material yang vital dan mempunyai potensi strategis (Wasito & Biyantoro, 2009). Contoh mineral logam tanah jarang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Contoh Mineral Logam Tanah Jarang, Kasiterit (SnO₂) dan Mineral Pengikutnya

(Sumber: Wasito & Biyantoro, 2009)

Selama ini telah diketahui lebih dari 100 jenis mineral tanah jarang, dan 14 jenis diantaranya diketahui mempunyai kandungan total % oksida tanah jarang tinggi. Logam tanah jarang memiliki sifat fisikokimia yang unik sehingga esensial dalam berbagai komponen teknologi tinggi (Wasito & Biyantoro, 2009). Mineral logam tanah jarang yang utama diantaranya Bastnaesit $(La, Ce)FCO_3$, monasit $(Ce, La, Y, Th)PO_4$, xenotim YPO_4 (Zhu *et al.*, 2015) dan zirkon (Xie *et al.*, 2014). Penjelasan masing-masing mineral sebagai berikut :

- (1) Bastnaesit $(La, Ce)FCO_3$, merupakan senyawa *fluoro-carbonate* cerium yang mengandung 60-70% oksida logam tanah jarang seperti *lanthanum* dan *neodymium*. Mineral bastnaesit merupakan sumber logam tanah jarang yang utama di dunia. Bastnaesit ditemukan dalam batuan karbonatit, breksi dolomit, pegmatit dan skarn amfibol (Atmawinata *et al.*, 2014).
- (2) Monasit $(Ce, La, Y, Th)PO_4$, merupakan senyawa fosfat logam tanah jarang yang mengandung 50-70% oksida logam tanah jarang (LTJ). Monasit umumnya diambil dari konsentrat yang merupakan hasil pengolahan dari endapan pada timah aluvial bersama dengan zirkon dan xenotim (Suprpto, 2008). Monasit memiliki kandungan thorium yang cukup tinggi, sampai dengan 12% oksida thorium atau rata-rata 6-7%, sehingga mineral tersebut memiliki sifat radioaktif (Atmawinata *et al.*, 2014).
- (3) Xenotim (YPO_4) , merupakan senyawa yttrium fosfat yang mengandung 54-65% logam tanah jarang termasuk erbium, cerium dan thorium. Xenotim juga mineral yang ditemukan dalam pasir mineral berat, serta dalam pegmatit dan batuan beku (Suprpto, 2008). Diperoleh sebagai produk sampingan dari penambangan dan pengolahan mineral berat, seperti kasiterit, ilmenit, zirkon, dan monasit di Asia Tenggara, serta penambangan dan pengolahan biji uranium di Kanada (Atmawinata

et al., 2014).

- (4) Zirkon ($ZrSiO_4$), merupakan senyawa zirkonium silikat yang didalamnya dapat terkandung thorium, yttrium dan cerium (Suprpto, 2008). Di Indonesia dihasilkan dari penambangan dan pengolahan kembali tailing tambang emas aluvial, terutama pada wilayah bekas tambang rakyat, yang umumnya tailing masih terpapar di permukaan. Zirkon juga merupakan produk sampingan dari tambang timah aluvial (Atmawinata *et al.*, 2014).

Dalam memperoleh mineral di atas, tidak bisa didapatkan dengan mudah, karena jumlah mineral tersebut sangat terbatas. Terlebih lagi, mineral tersebut tidak terpisah sendiri, tetapi tercampur dengan mineral lain. Unsur-unsur yang mendominasi dalam senyawa logam/unsur tanah jarang adalah lanthanum, cerium, dan neodymium (Amin, 2009). Salah satu senyawa yang menjadi fokus penelitian ini yaitu kandungan senyawa yang bersifat radioaktif. Kandungan senyawa tersebut dalam mineral-mineral logam tanah jarang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kandungan Uranium dan Thorium dalam Mineral Logam Tanah Jarang
(Sumber: Zhu *et al.*, 2015)

Mineral	Rumus kimia	Logam tanah jarang	Persentase berat (%)	
			ThO ₂	UO ₂
Bastnaesit	(Ce, La)(CO ₃)F	70-74	0-0,03	0,09
	(La, Ce)(CO ₃)F			
	Y(CO ₃)F			
Monasit	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄	35-71	0-20	0-16
	(La, Ce, Nd, Th) PO ₄			
	(Nd, Ce, La, Th)PO ₄			

Pemisahan atau pemurnian logam tanah jarang dari uranium (U) dan thorium (Th) dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu ekstraksi, resin penukar ion dan pengendapan (Hafni *et al.*, 2000). Namun dari pengolahan logam tanah jarang akan menghasilkan limbah yang masih mengandung banyak unsur radioaktif. Dan apabila tidak dikelola dengan baik, tentu akan berdampak buruk terhadap keseimbangan lingkungan. Pada penelitian ini akan difokuskan terhadap senyawa radioaktif thorium yang terkandung dalam limbah hasil pengolahan logam tanah jarang.

Penghilangan senyawa radioaktif thorium dari hasil pemurnian logam tanah jarang sangat diperlukan, karena mineral radioaktif berbahaya bagi kesehatan. Ketika limbah radioaktif diproduksi, maka diperlukan metode-metode disposal untuk menanganinya (Long *et al.*, 2010).

2.2 Limbah Radioaktif Thorium

2.2.1 Limbah Radioaktif

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 27 Tahun 2002, Limbah radioaktif adalah zat radioaktif dan atau bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir atau instalasi yang memanfaatkan radiasi pengion yang tidak dapat digunakan lagi (Athiyah, 2010). Limbah radioaktif adalah limbah yang mengandung sejumlah radionuklida-radionuklida yang mempunyai sifat berbahaya terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan bila tidak dikelola dengan baik.

Berbagai kegunaan bahan radioaktif adalah untuk meningkatkan atau memfasilitasi aktivitas manusia dan kualitas hidup. Limbah radioaktif dihasilkan dari berbagai penggunaan bahan radioaktif seperti dalam bidang kesehatan dan industri.

Limbah radioaktif yang dihasilkan beresiko terhadap lingkungan dan makhluk hidup di sekitarnya, sehingga perlu diberi perhatian khusus dalam mengolah limbah radioaktif.

Secara umum, sumber limbah radioaktif dibagi menjadi dua yaitu nuklir dan non nuklir. Sumber limbah nuklir, termasuk dalam penambangan dan penggilingan bahan uranium alami dan bahan yang mampu melakukan fisi, pembuatan bahan bakar nuklir, yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga nuklir, dan pemrosesan kembali bahan bakar nuklir. Limbah radioaktif ditimbulkan dari produksi isotop, laboratorium radioaktif dan sel yang berhubungan dengan siklus sumber bahan bakar nuklir. Semua tahap pembentukan bahan bakar nuklir menghasilkan beberapa tipe dan tingkatan limbah yang berbeda sebagai berikut (1) terkontaminasi ekstrak pelarut dengan aktivitas alfa dan gamma seperti U^{234} , U^{235} , U^{238} , Pu^{234} dan Th^{234} , dan (2) limbah padat dan cair yang terkontaminasi dengan produk fisi seperti Cs^{137} dan H^3 . Sumber limbah non nuklir, yang termasuk diantaranya yaitu isotop radioaktif yang digunakan dalam industri dan kesehatan dalam diagnosa seperti sumber I^{125} , I^{131} , Tc^{99m} dan Ir^{192} (El-Aziz & Khalifa, 2016).

Dalam Undang-Undang No. 10 Tahun 1997 tentang ketenaganukliran ditetapkan bahwa klasifikasi limbah radioaktif dibagi atas 3 jenis, yaitu limbah tingkat rendah (*low level waste*), limbah tingkat sedang (*intermediate level waste*) dan limbah tingkat tinggi (*high level waste*) (Aisyah, 2014).

Menurut *International Atomic Energy Agency* dalam El-Aziz & Khalifa (2016) limbah radioaktif secara kualitatif dapat diklasifikasikan ke dalam enam kategori yaitu :

- (1) *Exempted Level Waste (ELW)* : Limbah ini memenuhi kriteria dalam perizinan, pembebasan atau pengeluaran dari kontrol regulasi untuk tujuan proteksi radiasi.
- (2) *Very Short Lived Waste (VSLW)* : Limbah yang dapat disimpan untuk pembusukan

selama periode tertentu atau sampai beberapa tahun. Kelas ini termasuk limbah yang mengandung radionuklida dengan waktu paruh yang sangat pendek dan sering digunakan dalam penelitian dan medis.

- (3) *Very Low Level Waste (VLLW)* : Limbah yang mungkin memenuhi kriteria ELW, tetapi tidak perlu penahanan dan isolasi tingkat tinggi dan oleh karena itu, cocok untuk pembuangan di dekat permukaan jenis fasilitas TPA dengan kontrol peraturan terbatas.
- (4) *Low Level Waste (LLW)* : Limbah yang berada di atas tingkat perizinan, tetapi dengan jumlah yang terbatas radionuklida berumur panjang. Limbah seperti ini membutuhkan isolasi penahanan untuk jangka waktu sampai beberapa ratus tahun dan cocok untuk pembuangan di rekayasa dekat situs repositori permukaan.
- (5) *Medium Level Waste (MLW)* : Limbah yang terutama berisi radionuklida yang memiliki waktu tinggal lama dan memerlukan tingkat penahanan dan isolasi yang lebih besar dari yang disediakan oleh pembuangan dekat permukaan. Limbah berisi radionuklida berumur panjang, khususnya, alfa memancarkan radionuklida yang tidak akan membusuk ke tingkat konsentrasi aktivitas. Kelas ini membutuhkan pembuangan pada kedalaman lebih besar, dari urutan puluhan meter untuk beberapa ratus meter.
- (6) *High Level Waste (HLW)* : Limbah dengan tingkat konsentrasi aktivitas yang cukup tinggi untuk menghasilkan jumlah yang signifikan oleh proses peluruhan radioaktif atau limbah dengan jumlah radionuklida berumur panjang yang besar yang perlu dipertimbangkan dalam desain fasilitas pembuangan untuk limbah tersebut.

Limbah thorium yang digunakan dalam penelitian ini termasuk ke dalam kategori limbah *low level waste (LLW)* karena thorium mempunyai radiasi yang berbahaya dan

memiliki waktu paruh yang panjang (Zhu *et al.*, 2015).

2.2.2 Thorium

Thorium termasuk dalam unsur aktinida dengan nomor atom 90 dan nomor masa 232,0381 dan merupakan elemen ke dua pada rangkaian aktinida (5f) dalam tabel sistem periodik. Dalam keadaan murni thorium adalah suatu logam berwarna putih keabu-abuan. Thorium merupakan logam radioaktif dimana terkandung sekitar 12 juta ppm dalam tanah. Thorium alam terdiri dari satu isotop, ^{232}Th dimana sebagai pemancar sinar alfa (Irianto *et al.*, 2012) dengan waktu paruh 1,41010 tahun (Mirvakili *et al.*, 2015).

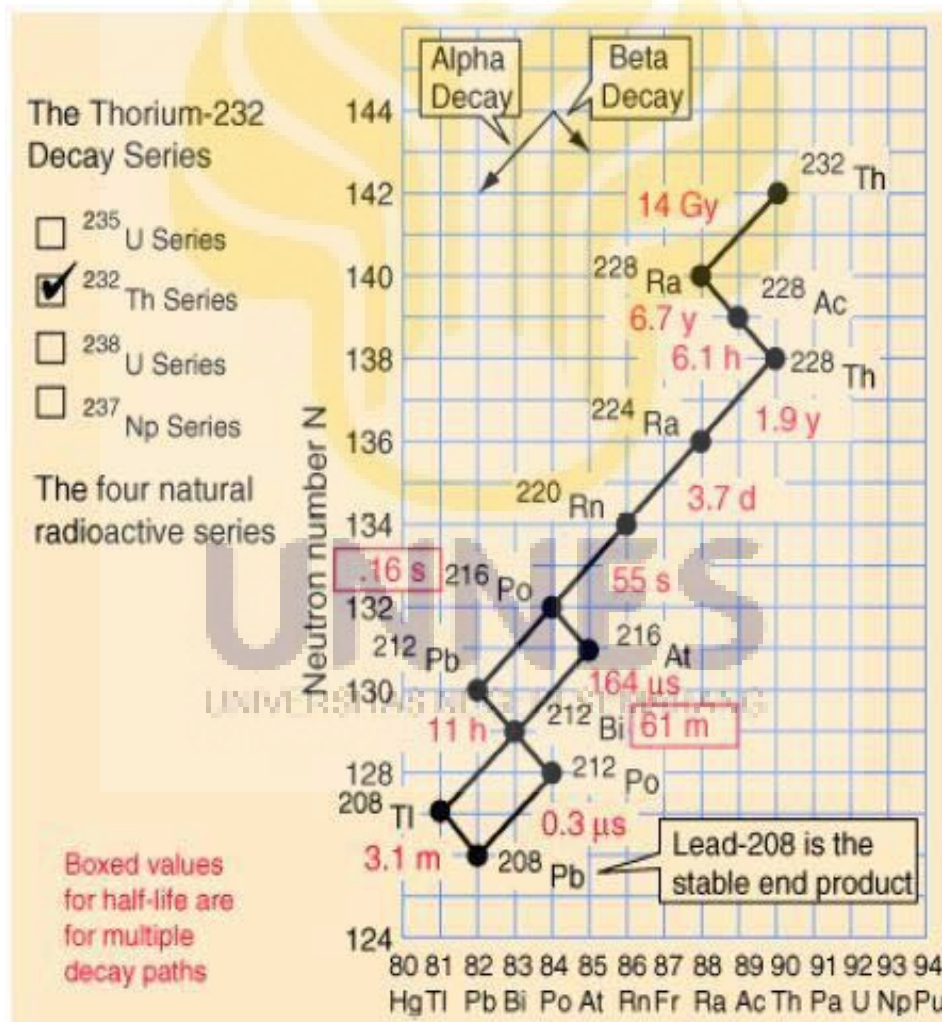
Menurut Wilis (1989), bila suatu unsur memancarkan partikel alfa, maka dihasilkan nuklida baru yang massanya berkurang dengan empat muatannya berkurang dengan dua, sehingga terbentuk unsur baru yang terletak dua tempat sebelah kiri dari unsur semula dalam sistem periodik dan ditunjukkan pada persamaan (1).



Thorium mempunyai bilangan oksidasi +4 larut dalam HCl dan HNO₃. Unsur ini mempunyai titik leleh 1740-1760°C, titik didih 4760-4800°C (Irianto *et al.*, 2012), kerapatan 11,7 g.cm⁻³ dan struktur kristal kubus pusat sisi (Nugraheni *et al.*, 2012). Isotop-isotop thorium mempunyai nomor massa antara 212 – 234. Thorium mempunyai anak luruh, ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Bi , ^{212}Po . Isotop thorium (^{232}Th) juga merupakan sumber bahan bakar nuklir yang sangat penting selain uranium. ^{232}Th dapat disebut bahan pembiak (*breeder material*) yang dapat membelah ^{232}U dengan cara menangkap neutron (Irianto *et al.*, 2012). Isotop dan deret thorium disajikan berturut-turut dalam Tabel 2.2 dan Gambar 2.2

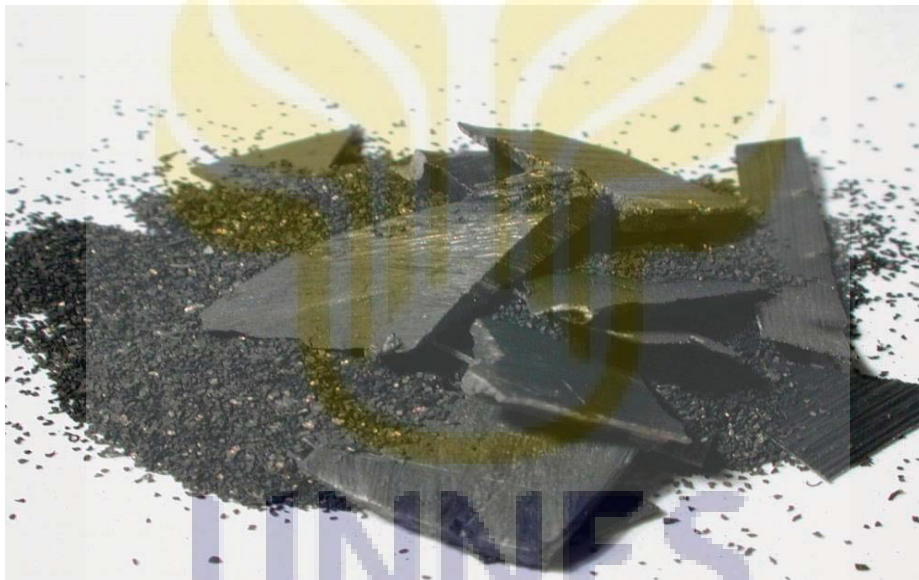
Tabel 2.2 Isotop Thorium
(Sumber: Milanese *et al.*, 2016)

Isotop	Periode Waktu Paruh	Radiasi	Energi (MeV)	Hasil Peluruhan
^{226}Th	30,6 bulan	α	5,99	^{222}Ra
^{227}Th	18,7 hari	α	6,14	^{223}Ra
^{228}Th	1,9 tahun	α	5,52	^{224}Ra
^{229}Th	7,340 tahun	α	5,17	^{225}Ra
^{230}Th	75,380 tahun	α	4,78	^{226}Ra
^{231}Th	25,5 jam	β^-	0,39	^{231}Pa
^{232}Th	$1,4 \times 10^{10}$ tahun	α	4,08	^{228}Ra
^{233}Th	22,3 bulan	β^-	1,24	^{233}Pa
^{234}Th	24,1 hari	β^-	0,27	^{234}Pa



Gambar 2.2 Deret Thorium
(Sumber: Nugraheni *et al.*, 2012)

Thorium terdapat pada beberapa mineral antara lain monasit $(\text{Ce, La, Th})\text{PO}_4$, (Egorov *et al.*, 2014), thorite (ThO_2) , thorianite $(\text{Th, U})\text{O}_2$ (Nugraheni *et al.*, 2012), zirkon (ZrSiO_2) , xenotim (YPO_4) dan alanit $(\text{Ca, Ce, La, Y})_2(\text{Al, Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$. Thorianite adalah mineral yang mengandung sekitar 12% thorium oksida. Monasit mengandung thorium 2,5%, alanit 0,1-2% dan zirkon 0,4%. Keberadaan thorium dalam kerak bumi pada kondisi umum beberapa kali lebih berlimpah dari semua isotop uranium, bahkan kelimpahan ^{232}Th beberapa ratus kali lebih banyak daripada ^{235}U (Ngadenin *et al.*, 2014). Thorium digunakan sebagai bahan bakar nuklir dan sebagai bahan pembuat kaos lampu petromaks (Bintarti *et al.*, 2002). Secara fisik logam thorium disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Logam Thorium
(Sumber: Voxpopulindo.com, 2016)

Thorium adalah residu beracun utama dalam proses pengolahan logam tanah jarang (Atmawinata *et al.*, 2014). Thorium berbahaya untuk pernapasan atau beresiko kanker paru-paru dan leukimia (sebagai contoh dosis efektif 1 Sievert dapat diperoleh dengan menghirup 2,22 g thorium). Thorium yang terakumulasi akan meningkatkan resiko paparan unsur ini. Bahaya paparan ini sangat besar kemungkinannya untuk pekerja

tambang, pabrik atau produksi dengan thorium seperti gelas keramik dan mantel lentera (Milanese *et al.*, 2016).

2.3 Penanganan Limbah Radioaktif

Berbagai penanganan limbah radioaktif yang telah dilakukan yaitu immobilisasi limbah radioaktif uranium (Gunandjar *et al.*, 2015), immobilisasi limbah radioaktif molibdenum, dalam pengolahan secara immobilisasi limbah cair dikungkung ke dalam bahan matriks *synroc* yang dibuat dari Al_2O_3 , BaO, CaO, TiO_2 dan ZrO_2 (Gunandjar *et al.*, 2016). Pengolahan ini kurang efektif karena dibutuhkan beberapa bahan kimia dalam pembuatan matriks *synroc*.

Proses pengolahan limbah radioaktif cair lain yaitu denitrifikasi limbah radioaktif cair yang mengandung asam nitrat dengan proses biooksidasi (Salimin & Rachmadetin, 2010), dalam proses tersebut limbah radioaktif cair yang diolah beraktivitas rendah mengandung asam nitrat 10% berat ditimbulkan dari proses penghilangan kerak evaporator dan limbah asam nitrat (2-3 N) dari pengambilan kembali uranium dalam gagal fabrikasi bahan bakar. Limbah tersebut berbahaya sehingga asam nitrat harus diuraikan dan unsur radioaktifnya diendapkan. Proses biooksidasi limbah radioaktif cair simulasi yang mengandung asam nitrat 2,5% atau 25000 ppm dan aktivitas uranium 10^{-4} Ci/m³ atau 3700 Bq/L dengan campuran bakteri mutan *bacillus sp*, *pseudomonas sp*, *aeromonas sp*, dan *arthrobacter sp* untuk denitrifikasi asam nitrat dan pengendapan uranium telah dilakukan. Bakteri yang diberi nutrisi dan aerasi memerlukan waktu aklimatisasi 82 jam dalam limbah di mana deviasi nilai efisiensi penguraian nitrat dan penyisihan uranium masing-masing kurang dari 10%. Waktu proses 88 jam dapat menurunkan kadar nitrat menjadi 18,75 ppm yang telah memenuhi nilai baku mutunya

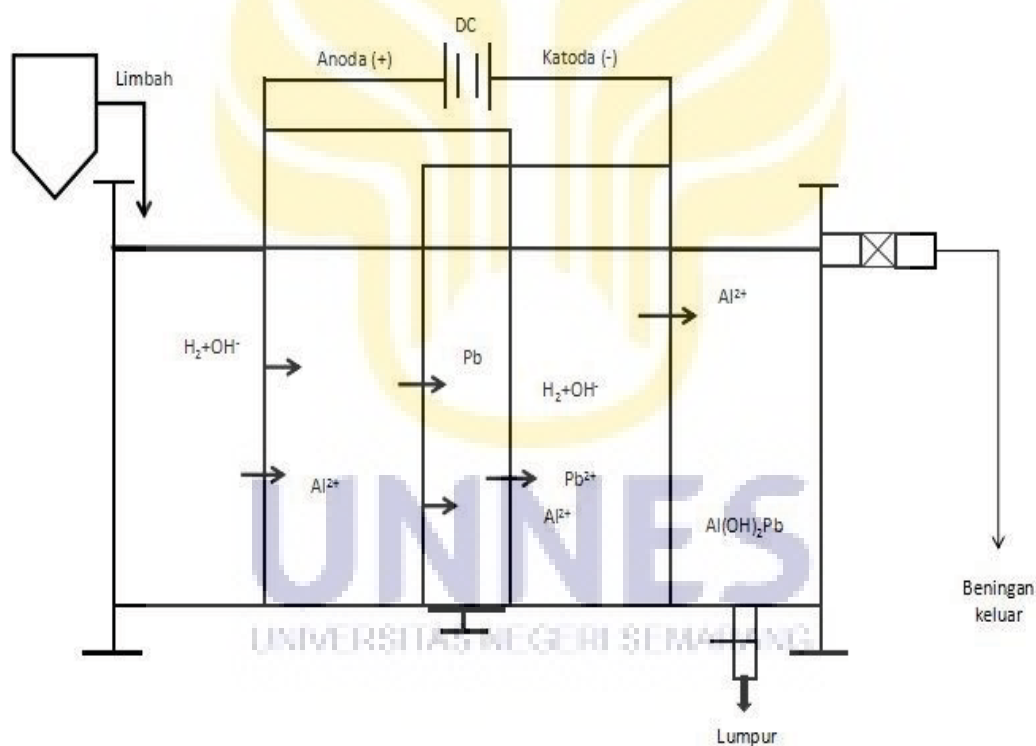
(20 ppm) dengan efisiensi penguraian nitrat 99,29%. Kadar uranium dalam beningan sebesar 817 Bq/L (nilai baku mutunya 1000 Bq/L) dicapai selama waktu proses 464 jam atau 19 hari. Pengolahan dengan metode ini juga tidak efektif karena dibutuhkan waktu yang lama dalam prosesnya dan dihasilkan penurunan yang kecil. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk mengolah limbah yaitu proses elektrokoagulasi.

2.4 Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi merupakan gabungan dari proses elektrokimia dan proses flokulasi-koagulasi (Prayitno & Kismolo, 2012). Koagulasi merupakan suatu proses pengolahan air dengan menggunakan sistem pengadukan cepat sehingga dapat mereaksikan bahan kimia (koagulan) secara seragam ke seluruh bagian air di dalam suatu reaktor. Flokulasi merupakan suatu proses pengolahan air dengan menggunakan sistem pengadukan lambat sehingga dapat membentuk flok-flok yang berukuran lebih besar dan dapat diendapkan diproses sedimentasi (Reynold dalam Trapsilasiwi & Assomadi, 2010). Pengadukan cepat berlangsung untuk membantu partikel-partikel halus di dalam air saling bertumbukan sehingga membentuk mikroflok, sedangkan pengadukan lambat berperan dalam upaya penggabungan flok (Hendrawati et al., 2013).

Elektrokoagulasi juga merupakan proses destabilisasi suspensi, emulsi dan larutan yang mengandung kontaminan dengan cara mengalirkan arus listrik melalui air, menyebabkan terbentuknya gumpalan yang mudah dipisahkan (Rachmawati *et al.*, 2014). Proses ini berdasar pada penggunaan elektroda (Tian *et al.*, 2016) yang terbuat dari besi atau alumunium atau logam lain (Liu *et al.*, 2015). Dalam proses elektrokoagulasi, elektroda besi atau alumunium akan membentuk koagulan yang digunakan untuk memisahkan kontaminan dalam limbah (Kobyia *et al.*, 2003).

Untuk menghasilkan ion logam yang berfungsi sebagai koagulan diperlukan beda potensial diantara elektroda. Perbedaan potensial ini diperlukan untuk menimbulkan reaksi elektrokimia pada masing-masing elektroda (Trapsilasiwi & Assomadi, 2010). Proses ini menggunakan reaksi reduksi dan oksidasi (Ashari *et al.*, 2015) dimana ion positif (kation) bergerak ke katoda dan menerima elektron yang direduksi dan ion negatif (anion) bergerak ke anoda dan menyerahkan elektron yang dioksidasi (Susetyaningsih *et al.*, 2008). Ketika hal ini diterapkan, ion logam yang dihasilkan bereaksi dengan hidroksida primer dan menghasilkan polihidroksida dan flok logam polihidroksida (Tian *et al.*, 2016). Skema proses elektrokoagulasi disajikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema Proses Elektrokoagulasi
(Sumber: Susetyaningsih *et al.*, 2008)

Kelebihan dan kelemahan dalam proses elektrokoagulasi menurut Rachmawati *et al.* (2014) yaitu sebagai berikut. Kelebihan proses elektrokoagulasi antara lain :

- (1) Elektrokoagulasi butuh peralatan sederhana dan mudah untuk dioperasikan.
- (2) Air limbah yang diolah dengan elektrokoagulasi menghasilkan *effluent* yang jernih, tidak berwarna dan tidak berbau.
- (3) Flok yang terbentuk pada elektrokoagulasi memiliki kesamaan dengan flok yang berasal dari koagulasi kimia. Perbedaannya adalah flok dari elektrokoagulasi berukuran lebih besar dengan kandungan air yang sedikit, lebih stabil dan mudah dipisahkan secara cepat dengan filtrasi.
- (4) Lebih cepat mereduksi kandungan koloid yang paling kecil, hal ini disebabkan menggunakan medan listrik dalam air sehingga mempercepat pergerakan yang demikian rupa agar memudahkan proses elektrokoagulasi.
- (5) Elektrokoagulasi menghasilkan *effluent* yang mengandung *Total Dissolved Solid* (TDS) dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan pengolahan kimiawi. TDS yang rendah akan mengurangi biaya *recovery*.
- (6) Proses elektrokoagulasi tidak memerlukan penggunaan bahan kimia sehingga tidak bermasalah dengan netralisasi.
- (7) Gelembung gas yang dihasilkan pada proses elektrokoagulasi ini dapat membawa polutan ke permukaan air sehingga mudah dibersihkan.
- (8) Dapat memberikan efisiensi proses yang cukup tinggi untuk berbagai kondisi dikarenakan tidak dipengaruhi suhu.
- (9) Pemeliharaan lebih mudah karena menggunakan sel elektrolisis yang tidak bergerak.

sedangkan kelemahan proses elektrokoagulasi antara lain :

- (1) Tidak dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang mempunyai sifat elektrolit cukup tinggi dikarenakan akan terjadi hubungan singkat antar elektroda.
- (2) Besarnya reduksi logam berat dalam limbah cair dipengaruhi oleh besar kecilnya arus voltasi listrik searah pada elektroda, luas sempitnya bidang kontak elektroda dan jarak antar elektroda.
- (3) Elektroda yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi harus diganti secara teratur.
- (4) Terbentuknya lapisan di elektroda dapat mengurangi efisiensi pengolahan.

2.4.1 Hukum Faraday

Lekhlif *et al.* (2014) partikel koloid membentuk suspensi yang stabil (potensial zeta negatif) didestabilisasi oleh adisi kation logam. Umumnya logam yang digunakan yaitu besi dan aluminium karena kedua logam murah dan mempunyai valensi yang tinggi (+III). Muatan positif dari logam tersebut berinteraksi dengan muatan negatif dari kontaminan dan terjadi difusi lapisan ganda (*double layer*), dan elektrostatik interpartikel menurun (potensial zeta negatif) dan berkurang, sehingga koagulasi dapat terjadi dengan pembentukan floks dan jembatan partikel koloid masih berada dalam larutan. Reaktor elektrokoagulasi menggunakan generator DC. Logam dielektrolisis dan bergantung oleh suplai dari generator. Demikian dapat ditunjukkan oleh hukum Faraday yang ditunjukkan oleh persamaan (2).

$$W = \frac{i.t.Mr}{n.F} \quad (2)$$

dengan

W : berat logam yang tidak larut (g)

i : kuat arus yang digunakan (A)

t : waktu kontak (s)

F : konstanta Faraday, 96.500 Coulomb/mol

M_r : berat molekul logam (g/mol)

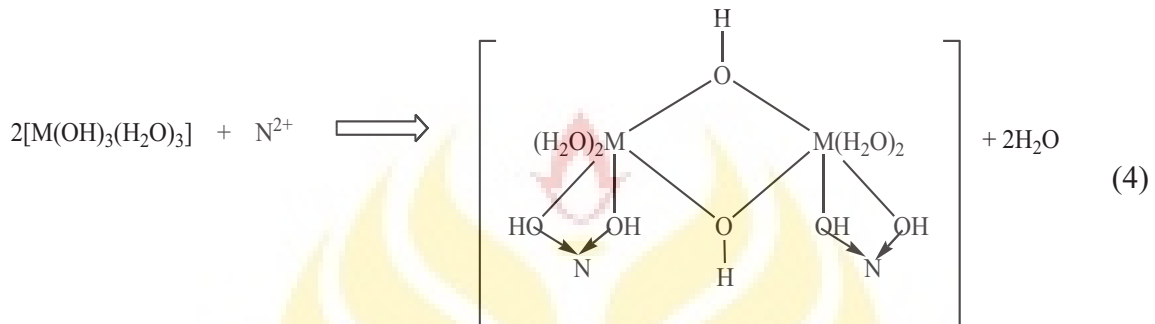
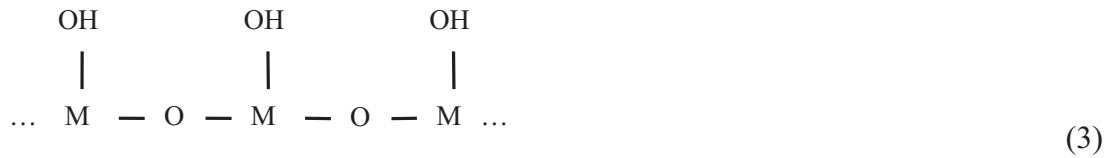
n : valensi logam

2.4.2 Reaksi Kimia yang Terjadi Pada Elektroda

Proses elektrokoagulasi terjadi karena pengendapan elektrokoagulasi dengan adanya medan listrik diantara dua elektroda sehingga ion logam terlepas dari anoda melalui reaksi oksidasi (Prayitno *et al.*, 2016). Menurut Daneshvar *et al.* (2002) mekanisme yang terdapat dalam proses ini meliputi adsorpsi, ko-presipitasi, pembentukan kompleks permukaan dan tarik menarik elektrostatik. Namun seringkali proses ini terjadi secara tumpang tindih dan sulit dibedakan. Dua mekanisme sederhana disajikan untuk menggambarkan proses tersebut yang meliputi: presipitasi dan adsorpsi. Adsorpsi terdiri dari pembentukan kompleks permukaan dan tarik menarik elektrostatik.

Mengacu pada penelitian Daneshvar *et al.* (2002) dengan menggunakan elektroda besi untuk menghilangkan kandungan Mg^{2+} . Salah satu spesies utama dari larutan berupa $[Fe(OH)_3.(H_2O)_3]_2$, yang akan mengikat Mg^{2+} dengan membentuk reaksi kompleks, tarik menarik elektrostatik dan presipitasi. Sebagai hasil dari dehidrasi, $Fe(OH)_3$ akan diubah menjadi $FeOOH$ (besi hidrooksida), yang merupakan salah satu monomer dari polimer hidroksi. Pada penelitian ini salah satu spesies utama dari larutan berupa $[Al(OH)_3.(H_2O)_3]_2$, yang akan mengikat kontaminan (Th^{4+}). Maka sebagai hasil dari dehidrasi, $Al(OH)_3$ akan diubah menjadi $AlOOH$ (Alumunium hidrooksida), yang merupakan salah satu monomer dari polimer hidroksi. Secara umum untuk logam

hidroksida disajikan dalam persamaan (3) dan (4) sedang pembentukan kompleks permukaan baik polutan berupa kation atau anion disajikan dalam Gambar 2.5.



dengan

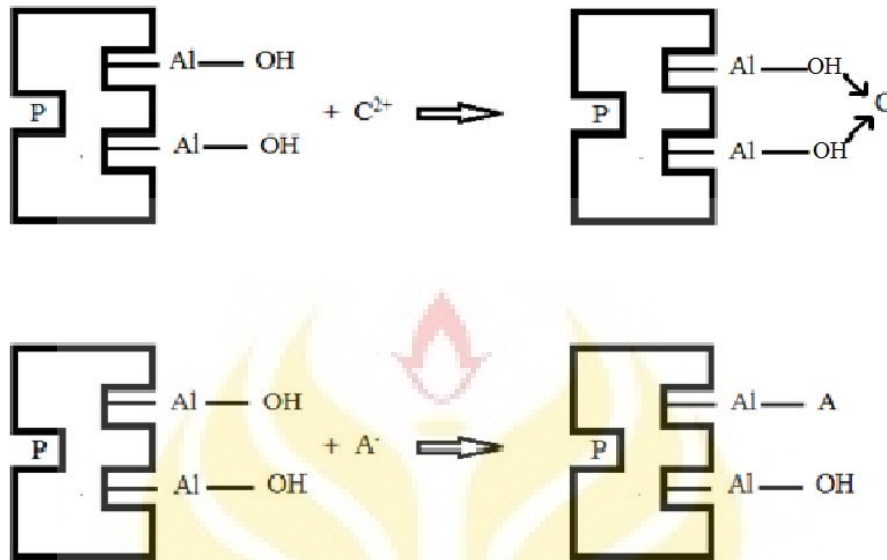
M : ion logam

N : ion yang akan dihilangkan

Menurut Daneshvar *et al.* (2002) dalam hal ini, proses penghilangan polutan terjadi dalam dua tahap :

- (1) Pembentukan kompleks permukaan oleh terhubungnya polimer hidroksi menjadi partikel tersuspensi.
- (2) Peran polimer hidroksi dalam proses menghilangkan polutan adalah menghubungkan melalui ion dan meningkatkan konsentrasi dan akan membentuk reaksi kimia. Kombinasi logam hidroksida dalam variasi kompleks permukaan terdiri dari daerah yang bermuatan positif dan negatif serta muatan oposisi yang bersifat menarik,

dimana daerah tersebut cukup kuat untuk menghilangkan spesies terlarut dan ion dalam fasa larutan.



Gambar 2.5 Pembentukan Kompleks Permukaan untuk Penghilangan Ion
 P = partikel tersuspensi, C = kation, A = Anion
 (Sumber: Berdasar Daneshvar *et al.*, 2002)

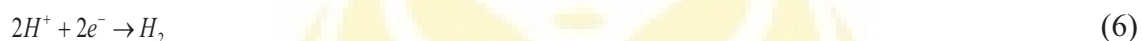
Pada Gambar 2.5 penghilangan ion terjadi dengan pembentukan kompleks permukaan. Ion yang dihilangkan dapat berupa kation maupun anion, dimana ion tersebut akan mengikat ataupun menggantikan gugus OH pada koagulan.

Transfer elektron yang terjadi di setiap elektroda disebut reaksi elektroda. Substansi yang menerima dan melepas elektron disebut spesies elektroaktif. Proses ini terjadi pada permukaan elektroda dan melibatkan mekanika kuantum menerobos elektron antara elektroda dan spesies elektroaktif (Iqbal & Zaafrani, 2011). Elektrokoagulasi dapat dibuat ketika sebuah potensial diaplikasikan dari kekuatan eksternal elektroda. Dalam hal ini reaktor elektrokoagulasi sederhana dapat dibuat oleh satu anoda dan satu katoda,

dimana terjadi beberapa reaksi elektrokimia. Menurut Prayitno & Kismolo (2012) secara umum reaksi-reaksi yang terjadi yaitu sebagai berikut :

2.4.2.1 Katoda

Pada persamaan (6), ion H^+ dari suatu asam akan direduksi menjadi gas hidrogen yang akan bebas sebagai gelembung-gelembung gas, sedangkan larutan yang mengalami reduksi adalah pelarut (air) dan terbentuk gas hidrogen (H_2) pada katoda yang ditunjukkan oleh persamaan (7).



2.4.2.2 Anoda

Anoda terbuat dari logam akan teroksidasi yang secara umum ditunjukkan oleh persamaan (8), sedangkan ion OH^- dari basa akan mengalami oksidasi membentuk gas oksigen (O_2) yang ditunjukkan oleh persamaan (9).



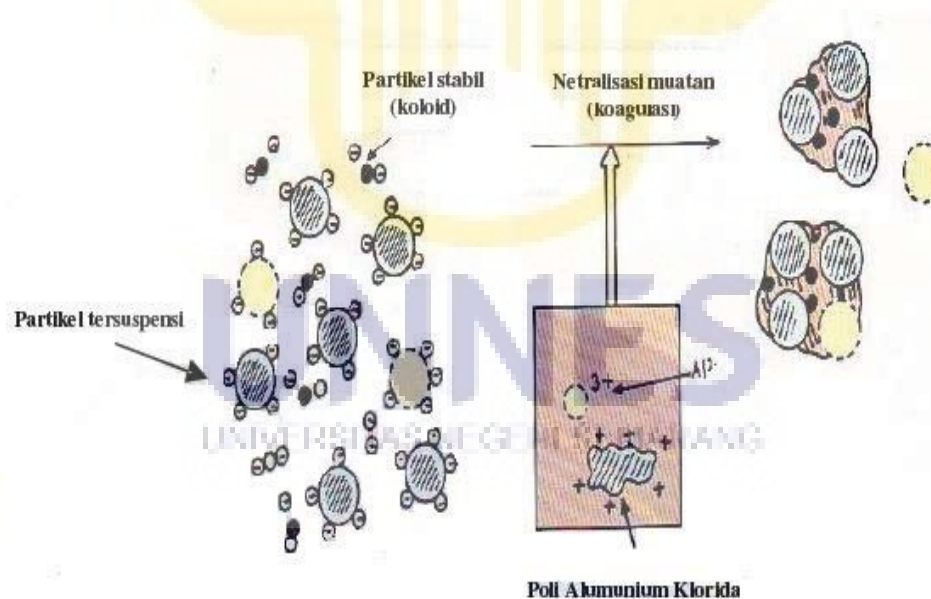
Reaksi yang terjadi menggunakan elektroda aluminium dan tembaga dapat dilihat dalam Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Reaksi Anoda Aluminium dan Tembaga

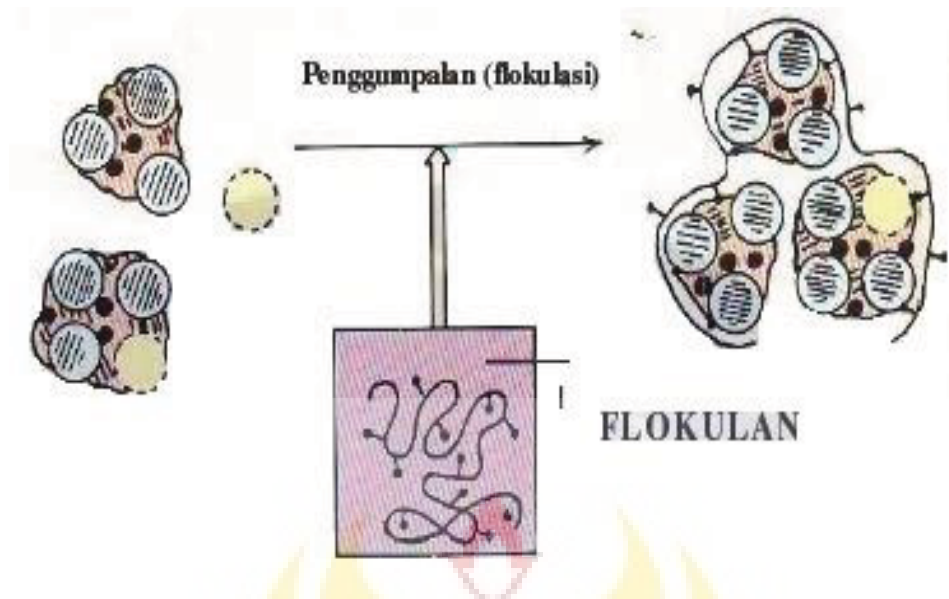
Elektroda	Kondisi asam	Kondisi basa
Aluminium $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$	$Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$
Tembaga $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	$Cu^+ + O_2 + 2H_2O \rightarrow Cu^{2+} + 4OH^-$	$Cu^{2+} + 2OH^- \rightarrow Cu(OH)_2$

Dari reaksi tersebut, pada anoda akan dihasilkan gas H_2 , buih dan flok logam hidroksida (Susetyaningsih *et al.*, 2008). Selanjutnya flok yang terbentuk akan menjebak secara elektroionik terhadap logam atau kontaminan (Prayitno & Kismolo, 2012). Ketika medan magnet diantara plat elektroda masih cukup besar, sistem ionik dari polutan limbah cenderung akan berkompeten membentuk suatu flok-flok dengan ukuran yang jauh lebih besar sehingga proses oksidasi pada plat anoda juga semakin besar (Prayitno *et al.*, 2016).

Mekanisme pengendapan flok logam hidroksida pada proses elektrokoagulasi mengikuti prinsip koagulasi-flokulasi karena adanya pertumbuhan massa flok sehingga berat jenis flok menjadi besar dan akhirnya mengendap (Kurniasih *et al.*, 2016). Mekanisme koagulasi dan flokulasi berdasar Susanto (2008) dijelaskan berturut-turut pada Gambar 2.6 dan 2.7 berikut.



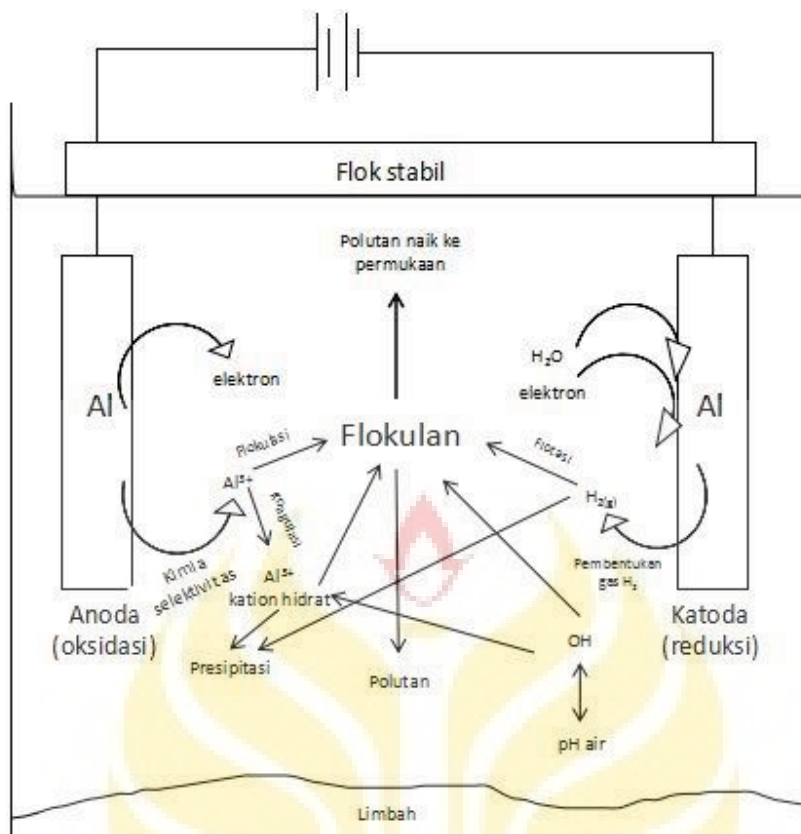
Gambar 2.6 Mekanisme Proses Koagulasi
(Sumber : Susanto, 2008)



Gambar 2.7 Mekanisme Proses Flokulasi
(Sumber : Susanto, 2008)

Hal ini juga dapat terjadi karena adanya perubahan arus listrik akan terjadi medan magnet di sekitar elektroda. Dengan adanya medan magnet di sekitar elektroda, maka ion-ion logam (kontaminan) akan bergerak dengan lintasan berbentuk heliks mengitari plat elektroda sehingga pada saat itu ada kecenderungan ion-ion logam (kontaminan) dapat menempel pada seluruh permukaan plat elektroda (Kurniasih *et al.*, 2016).

Gelembung gas H_2 yang terjadi selama proses akan membantu mendorong polutan sehingga mengapung ke permukaan. Pengapungan gumpalan polutan karena gelembung gas yang terbentuk pada proses elektrolisis disebut dengan elektroflotasi (Rachmawati *et al.*, 2014). Flok-flok yang mengapung akan mengendap apabila telah mencapai berat yang cukup (Hanum *et al.*, 2015). Berdasarkan beberapa penelitian, diameter gelembung memiliki diameter antara 20 sampai 100 μm (Lekhlif *et al.*, 2014). Menurut Nasution *et al.* (2013) laju pembentukan hidrogen sekitar 0,9 L/menit, pembentukan maksimum gas hidrogen sekitar 22,68 L/jam. Mekanisme proses elektrokoagulasi disajikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mekanisme Proses Elektrokoagulasi
(Sumber: Kurniasih *et al.*, 2016)

2.4.3 Parameter Proses Elektrokoagulasi

2.4.3.1 Jenis Plat Elektroda

Jenis plat elektroda berpengaruh secara signifikan terhadap hasil proses pengolahan. Untuk pengolahan air minum, jenis plat elektroda harus non toksik, biaya rendah dan mudah didapatkan (Cerqueira & Marques, 2012).

2.4.3.2 Kuat Tegangan

Semakin besar tegangan maka besar penyisihan semakin besar. Kuat tegangan berbanding lurus dengan besarnya arus listrik yang mengalir pada elektroda. Arus listrik yang menyebabkan terjadinya transfer elektron dari elektroda ke larutan elektrolit. Adanya aliran listrik ini menyebabkan terjadinya reaksi kimia dalam larutan yaitu

semakin banyaknya logam hidroksida maupun gelembung (gas) yang terbentuk. Saat kuat tegangan tinggi, hidroksil yang larut dan kecepatan pembentukan logam hidroksida meningkat sehingga endapan yang dihasilkan lebih banyak dan meningkatkan penurunan polutan di dalam air (Kurniasih *et al.*, 2016). Tidak hanya pembentukan logam hidroksida, menurut Bazrafshan *et al.* (2012) kuat tegangan juga berpengaruh pada ukuran gelembung dan pembentukan flok. Kerapatan gelembung akan meningkat dan ukurannya akan menurun dengan bertambahnya kuat tegangan.

2.4.3.3 Kuat Arus

Arus listrik yang menyebabkan terjadinya transfer elektron dari elektroda ke larutan elektrolit. Adanya arus listrik ini menyebabkan terjadinya reaksi kimia dalam larutan yaitu semakin banyaknya logam hidroksida maupun gelembung (gas) yang terbentuk (Kurniasih *et al.*, 2016). Semakin besar kuat arus maka kerapatan gelembung semakin meningkat dan ukuran akan menurun, sehingga mempercepat penurunan polutan dan flotasi *sludge*. Namun jika kuat arus semakin menurun maka waktu reaksi yang dibutuhkan akan semakin lama pula (Bazrafshan *et al.*, 2012).

2.4.3.4 Waktu Kontak

Dalam teori, semakin lama waktu proses elektrokoagulasi maka pembentukan gas H₂ dan OH⁻ semakin banyak sehingga semakin banyak pula jumlah kompleks yang mengikat polutan dan jumlah gas hidrogen (Rachmawati *et al.*, 2014).

2.4.3.5 Konduktivitas

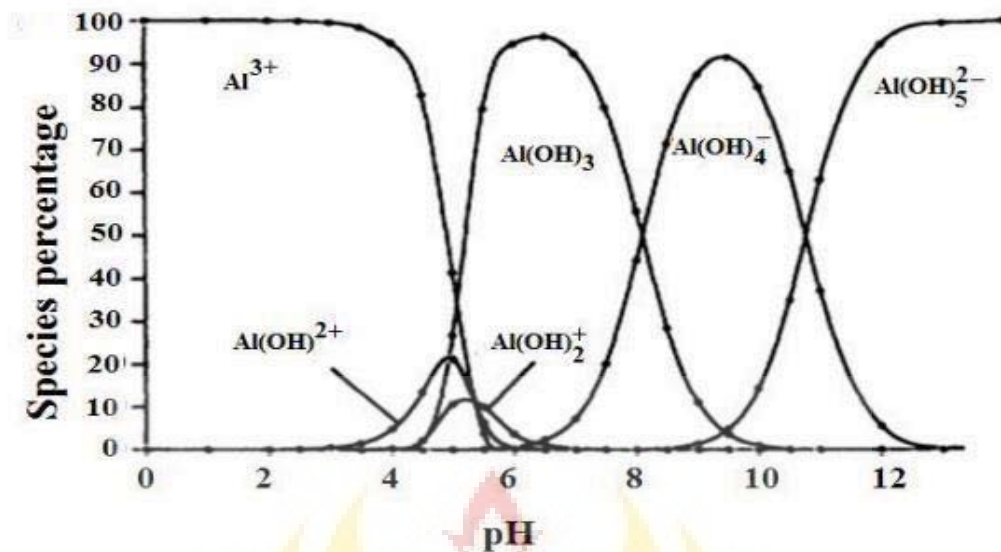
Konduktivitas elektrik *effluent* merupakan variabel yang berpengaruh terhadap efisiensi kuat arus, voltasi sel dan konsumsi energi. Konduktivitas elektrik *effluent* juga penting ketika optimisasi parameter sistem, mulai dari konduktivitas tinggi dengan jarak antar elektroda yang kecil meminimalkan konsumsi energi, tapi tidak efektif terhadap

efisiensi penurunan kontaminan. Konduktivitas *effluent*, yang disebut juga kapasitas untuk menghantarkan kuat arus listrik, sesuai untuk ion dalam cairan konduktif. Ion-ion tersebut berfungsi untuk menghantarkan kuat arus listrik. Maka, semakin tinggi konsentrasi ion dalam *effluent*, maka kemampuan untuk menghantarkan kuat arus listrik semakin besar dan kemungkinan terjadinya reaksi antar senyawa dalam *effluent* semakin besar (Cerqueira & Marques, 2012). Konsumsi energi akan menurun dengan meningkatnya konduktivitas larutan (Khandegar & Saroha, 2013).

2.4.3.6 Kondisi pH

Berdasar Lekhlif *et al.* (2014) proses elektrokoagulasi sangat bergantung pada pH larutan. Dalam proses elektrokoagulasi terdapat tiga mekanisme utama yaitu presipitasi, adsorpsi dan koagulasi (Akyol *et al.*, 2013). Pada pH rendah spesies logam umumnya pada anoda akan bergerak ke spesies anionik, dan akan terjadi penetralan muatan dan pengurangan kelarutan, proses ini disebut presipitasi (Akyol *et al.*, 2013). Sementara pada pH lebih dari 6,5 akan terjadi adsorpsi (Elnenay *et al.*, 2016) dan koagulasi (Akyol *et al.*, 2013). Umumnya ion logam akan terhidrolisis pada pH 7-9 untuk menghasilkan variasi kompleks logam hidroksida dan $M(OH)_3$ netral (Elnenay *et al.*, 2016).

Menurut Lekhlif *et al.* (2014) berdasarkan spesies mononuklir, total aluminium yang dihasilkan pada masing-masing nilai pH dapat dijelaskan berdasarkan Gambar 2.9. Diagram distribusi menyajikan proses hidrolisis yang bergantung pada total konsentrasi logam dan pH. Dalam kondisi asam, dominansi spesies kation bebas Al^{3+} sekitar pH 3,5. Semakin meningkatnya pH maka menghasilkan perbedaan distribusi kompleks hidroksida monomer dan polimer seperti $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{7+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$.



Gambar 2.9 Distribusi Spesies Hidrolisis Alumunium Berdasar pH
(Sumber: Lekhlif *et al.*, 2014)

Menurut Cerqueira & Marques (2012) proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda alumunium pada variasi pH berdasarkan observasi bahwa dalam kondisi asam berada pada $\text{pH} < 4$ dan dalam kondisi basa berada pada $\text{pH} > 9$. Mollah *et al.*, (2001) struktur dimerik dan polimerik Al^{3+} kompleks hidroksida disajikan dalam persamaan (10) berikut.

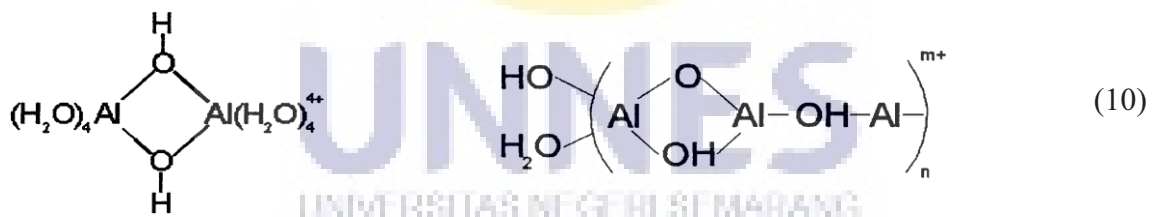
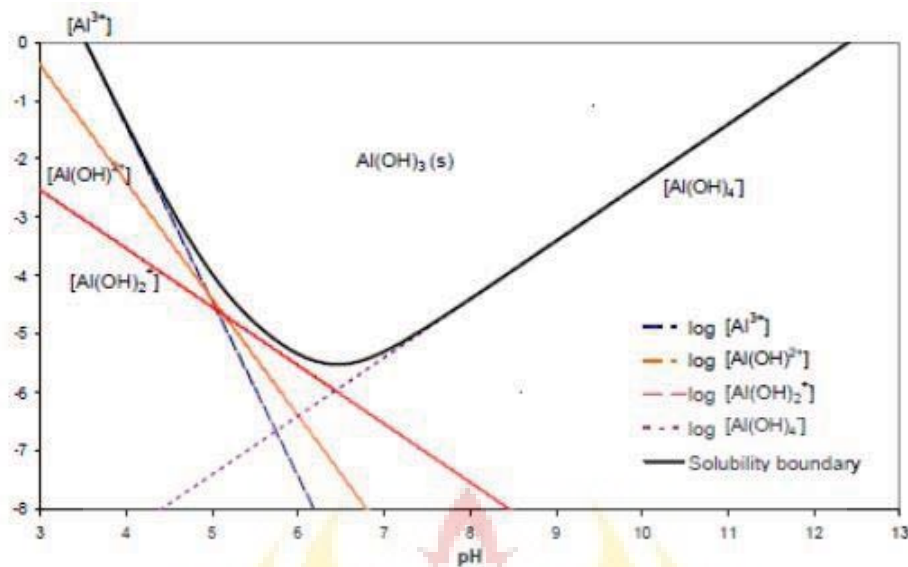


Diagram kelarutan dari alumunium hidroksida, $\text{Al}(\text{OH})_3$ dapat dijelaskan pada Gambar 2.10. Kelarutan sesuai keseimbangan termodinamika antara spesies alumunium dalam larutan pada pH tertentu dan padatan alumunium hidroksida. Kelarutan minimum (0,03 mg Al/L) terjadi pada pH 6,3 dan meningkat sesuai dengan larutan lebih basa atau asam (Cerqueira & Marques, 2012).

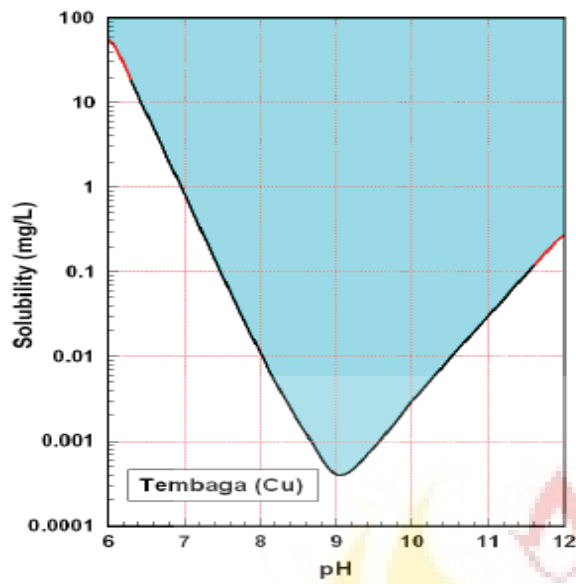


Gambar 2.10 Diagram Kelarutan Alumunium Hidroksida $Al(OH)_3$ Berdasarkan Spesies Mononuklir Al
(Sumber: Cerqueira & Marques, 2012)

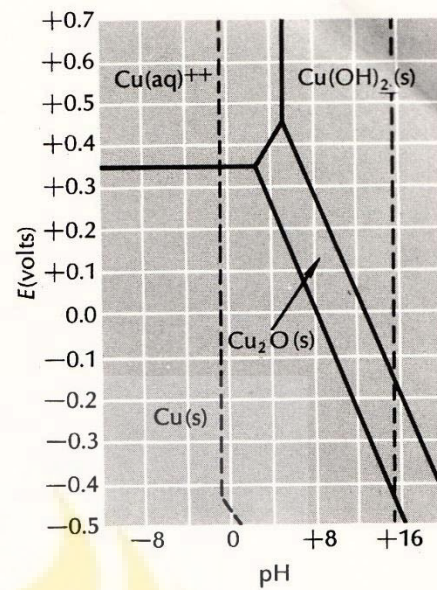
Berdasarkan (Cerqueira & Marques, 2012) diagram distribusi dan kelarutan yang disajikan di atas hanya berdasar pada spesies mononuklir Al, dimana dalam sistem tersebut terbentuk lebih kompleks. Bila konsentrasi Al meningkat, kompleks polinuklir alumunium dapat terbentuk dan alumunium hidroksida mengalami presipitasi, seperti dijelaskan dalam persamaan (11) berikut:



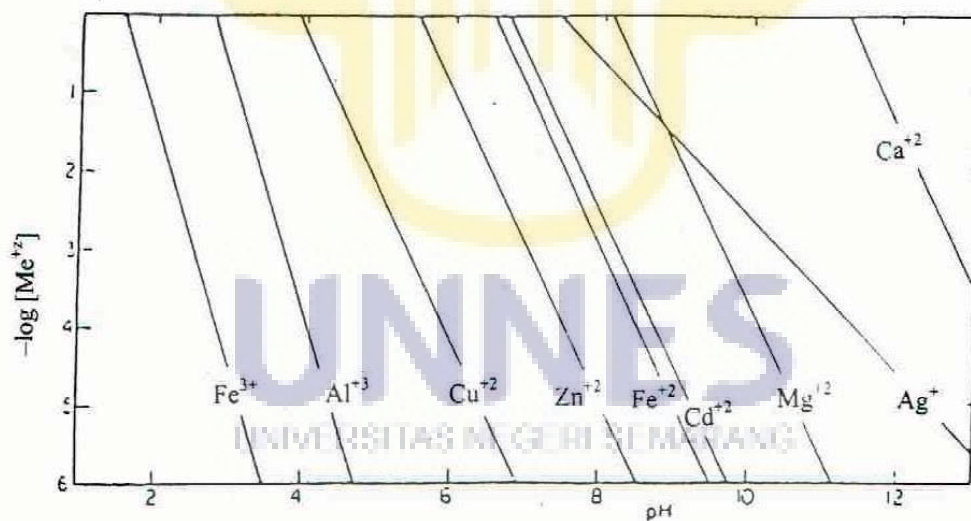
Untuk tembaga, disajikan diagram kelarutan tembaga yang disajikan pada Gambar 2.11 dan peta kondisi tembaga oksida dimana didalamnya terdapat kondisi pembentukan $Cu(OH)_2$ yang disajikan pada Gambar 2.12. Disajikan pula konsentrasi ion logam bebas dalam kesetimbangan dengan padatan oksida atau hidroksida dan termasuk didalamnya logam Cu pada Gambar 2.13. Dari ketiga gambar diketahui bahwa spesies $Cu(OH)_2$ terbentuk dari pH sekitar 6.



Gambar 2.11 Diagram Kelarutan Tembaga Hidroksida (Sumber: Said, 2010)



Gambar 2.12 Peta Kondisi Tembaga Oksida (Sumber: Snyder, 1966)



Gambar 2.13 Konsentrasi Ion Logam Bebas dalam Kesetimbangan Dengan Padatan Oksida Atau Hidroksida. Pembentukan Kompleks Logam Hidroksida Harus Berdasarkan Pada Kelarutan (Sumber: Yen, 1999)

2.4.3.7 Jarak Antar Elektroda

Jarak elektroda antar elektroda juga menjadi variabel penting untuk optimisasi operasi proses elektrokoagulasi. Berdasar Cerqueira & Marques (2012) saat konduktivitas *effluent* relatif tinggi, maka digunakan jarak antar elektroda yang lebih lebar. Namun sebaliknya, dalam elektrokoagulasi disarankan untuk menggunakan jarak yang kecil, untuk mengurangi konsumsi energi.

Ketika dilakukan pengujian sistem dibawah kuat arus yang sama, berdasarkan penelitian Den dalam Cerqueria & Marques (2012) bahwa terdapat perbedaan efisiensi penurunan polutan untuk setiap jarak antar elektroda yang berbeda, sehingga jarak antar elektroda termasuk salah satu faktor untuk optimisasi biaya. Dalam hal ini, semakin besar jarak antar elektroda, maka interaksi ion dalam larutan dengan koagulan semakin sedikit terjadi. Terdapat perbedaan antara dua penelitian tentang kemungkinan pemisahan dalam setiap nilai konduktivitas *effluent*, yang pertama (rentang antara 100 dan 140 mS cm⁻¹), tidak terdapat perubahan dalam efisiensi penurunannya, karena dengan semakin besarnya jarak antar elektroda, maka konduktivitas larutan akan semakin menurun. Sedang penelitian kedua menjelaskan, dengan mengesampingkan nilai konduktivitas *effluent*. Tetapi ia berasumsi bahwa penurunan ini akan lebih rendah daripada penelitian pertama, karena semakin meningkatnya jarak antar elektroda akan menyebabkan interaksi semakin menurun dan membutuhkan konduktivitas elektrik yang rendah. Sehingga, untuk penurunan akan berbeda dalam setiap jarak antar elektroda, dimana nilai konduktivitas harus rendah.

Semakin besar jarak antar elektroda, maka semakin besar pula tegangan yang dibutuhkan, karena larutan mempunyai resistansi terhadap kuat arus. Maka, berdasar karakteristik *effluent*, jarak antar elektroda dapat divariasikan untuk menghasilkan efisiensi

proses yang maksimal. Misal, jarak yang besar digunakan saat konduktivitas *effluent* relatif tinggi, sedang jarak yang lebih kecil digunakan untuk konduktivitas yang lebih rendah.

2.4.3.8 Susunan Elektroda

Bahan elektroda dan mode hubungan antar elektroda berperan secara signifikan dalam biaya analisis proses elektrokoagulasi (Khandegar & Saroha, 2013). Elektroda monopolar dalam hubungan secara paralel (MP-P), anoda dan katoda dihubungkan secara paralel yang mana kuat arus dibagi pada seluruh elektroda yang bertolakan satu sama lain. Hubungan secara paralel ini membutuhkan beda potensial yang rendah dibandingkan dengan hubungan secara seri; Elektroda monopolar dalam hubungan secara seri (MP-S), dalam elektroda monopolar yang disusun secara seri. Setiap pasangan elektroda (*sacrificial electrode*) yang mana didalamnya dihubungkan satu sama lain. Penambahan tegangan sel timah untuk meningkatkan beda potensial; serta elektroda bipolar dalam hubungan secara seri (BP-S), dalam mode hubungan ini, elektroda terluar dihubungkan pada *power supply* dan tidak ada hubungan listrik antara elektroda inner (Kobyia *et al.*, 2011).

2.4.3.9 Suhu

Efek suhu hanya berpengaruh kecil dalam proses elektrokoagulasi. Beberapa penelitian menjelaskan proses elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium semakin meningkat pada suhu mencapai 60°C, namun lebih dari suhu tersebut efisiensi menurun. Tetapi, konduktivitas semakin meningkat dengan meningkatnya suhu dan menurunkan konsumsi energi. Meningkatnya suhu pada larutan dapat meningkatkan efisiensi penurunan, karena meningkatkan perpindahan ion yang menyediakan terbentuknya koagulan (Cerqueira & Marques, 2012).

2.4.3.10 Pasivitas elektroda

Pasivitas elektroda merupakan akumulasi dari lapisan yang menghambat (biasanya pada anoda) dalam permukaan elektroda. Pasivitas tidak diperlukan dalam anoda dan sistem elektrokoagulasi. Pengendali utama pasivitas merupakan operasi dari mode galvanostatik. Kuat arus dan tegangan bergantung pada hambatan sistem secara keseluruhan. Setiap hambatan dari lapisan pasivitas meningkatkan potensial sel tapi tidak dapat mempengaruhi koagulan atau laju produksi gas secara keseluruhan (Khandegar & Saroha, 2013).

2.4.4 Efisiensi Penyisihan

Berdasar Kobya *et al.* (2014) efisiensi penyisihan setiap parameter dihitung dengan persamaan (12) sebagai berikut :

$$Eff(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (12)$$

dengan

C_0 : Kadar sebelum pengolahan

C_1 : Kadar setelah pengolahan elektrokoagulasi (*effluent*).

2.4.5 Konsumsi Energi dan Elektroda

Salah satu parameter yang paling penting yang mempengaruhi aplikasi metode pengolahan air dan limbah cair yaitu operasional biaya (Akyol *et al.*, 2013). Operasional biaya utama dalam pengolahan limbah cair dengan proses elektrokoagulasi adalah konsumsi energi listrik, elektroda logam (Nasution *et al.*, 2013), bahan kimia seperti bahan yang digunakan di laboratorium dan lainnya (Akyol *et al.*, 2013).

Berdasar Akyol *et al.* (2013) konsumsi elektroda dan energi dalam elektrokoagulasi dapat dihitung menggunakan persamaan (13) dan (14).

$$C_{\text{energi}} = \frac{U \cdot i \cdot t_{ec}}{v} \quad (13)$$

$$C_{\text{elektroda}} = \frac{i \cdot t_{ec} \cdot Mr}{z \cdot F \cdot v} \quad (14)$$

dengan

U : rata-rata tegangan sel (V)

i : kuat arus (A)

t_{ec} : waktu (jam)

Mr : berat molekul

F : konstanta Faraday (96.500 C/mol)

z : bilangan elektron yang terlibat reaksi oksidasi/reduksi

v : volume larutan (m^3).

Operasional biaya (Rp) dapat dirumuskan sesuai persamaan (15) berikut :

$$OC = aC_{\text{energi}} + bC_{\text{elektroda}} + cC_{\text{bahankimia}} \quad (15)$$

dengan

OC : *operational cost* atau operasional biaya (Rp)

$C_{\text{bahan kimia}}$: konsumsi jumlah bahan kimia (kg/m^3) dalam pengolahan limbah cair

a,b,c : konstanta

2.5 Spektrofotometer UV-Vis

Untuk menentukan konsentrasi thorium dalam penelitian ini digunakan spektrofotometer UV-Vis. Spektrofotometer UV-Vis adalah salah satu alat ukur untuk analisis unsur-unsur berkadar rendah secara kuantitatif maupun secara kualitatif. Penentuan secara kualitatif berdasarkan puncak-puncak yang dihasilkan pada spektrum

suatu unsur tertentu pada panjang gelombang tertentu, sedangkan penentuan secara kuantitatif berdasarkan nilai absorbansi yang dihasilkan dari spektrum senyawa kompleks unsur yang dianalisis dengan pengompleks yang sesuai (Noviarty & Angraini, 2013). Intensitas ini sangat tergantung pada tebal tipisnya media dan konsentrasi warna spesies yang ada pada media tersebut. Pembentukan warna dilakukan dengan cara menambahkan bahan pengompleks yang selektif terhadap unsur yang ditentukan (Fatimah *et al.*, 2009). Menurut Clark (1993) panjang gelombang untuk UV-Vis terdapat pada daerah spektrum (200-800 nm) yang diukur dalam nanometer (nm) atau angstrom (\AA) atau milimikrons.

Pada penentuan thorium dengan metode spektrofotometer UV-Vis pengompleks yang digunakan yaitu larutan arsenazo $((\text{HO})_2\text{C}_{10}\text{H}_2(\text{SO}_3\text{H})_2(\text{N}=\text{NC}_6\text{H}_4\text{AsO}_3\text{H}_2)_2$. Menurut Strelow *et al.* (2000) diazo, 1,8-dihydroxynaphthalene-3,6-disulphonic asam-2,7-bis [(azo-2)-asam phenylarsonic)] yang disebut juga arsenazo III, merupakan salah satu reagen yang sensitif untuk penentuan thorium. Struktur molekul arsenazo III disajikan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Struktur Molekul Arsenazo III
(Sumber: Dian *et al.*, 2012)

Menurut Dian *et al.* (2012) salah satu grup senyawa organik azo yaitu arsenazo III bila direaksikan dengan suatu unsur logam yang memiliki jari-jari ion lebih besar dari 0,7-0,8 Å akan membentuk senyawa kompleks warna. Berdasar pada tabel periodik jari-jari atom dalam Snyder (1966) yang dimuat selengkapnya pada Lampiran 1, thorium memiliki jari-jari ion (IV) lebih besar dari 0,8 Å yaitu sebesar 1,79 Å, sehingga menurut Fatimah *et al.* (2009) mampu membentuk senyawa kompleks dengan arsenazo III yang berwarna merah terang dengan panjang gelombang 665,0 nm.

Pengompleks yang ditambahkan pada penelitian ini berdasar pada penelitian Fatimah *et al.* (2009) untuk analisis thorium menggunakan metode spektrofotometer UV-Vis yaitu ditambahkan arsenazo III 0,2 % sebanyak 2 mL. Kestabilan waktu pembentukan kompleks yaitu selama 30 menit. Penentuan kestabilan waktu pembentukan kompleks telah dilakukan oleh Noviardy & Angraini (2013) yang dilakukan dengan melihat absorbansi dari senyawa kompleks Nd-arsenazo pada variasi waktu 0 sampai 70 menit. Hasilnya, intensitas serap Nd-arsenazo akan terus meningkat hingga waktu kompleks 30 menit dan mengalami penurunan intensitas serap hingga 70 menit. Pembentukan senyawa kompleks thorium arsenazo terjadi pada pH 2 sampai 3 dengan penambahan asam oksalat (Fatimah *et al.*, 2009). Semakin tinggi tingkat keasaman makin rendah intensitas serap yang diberikan (Noviardy & Angraini, 2013).

Dalam keadaan tertentu, substansi yang tidak berwarna atau hanya terdiri dari satu warna dapat diturunkan dengan penambahan reagen dan akan mengubahnya menjadi komponen-komponen warnanya. Hubungan warna dari pancaran sinar tampak disajikan dalam Tabel 2.4 (Ewing, 1985).

Tabel 2.4 Warna Pancaran Sinar Tampak
(Sumber: Ewing, 1985)

Panjang Gelombang (nm)	Warna	Komplementer
400-465	Ungu	Kuning-Hijau
465-482	Biru	Kuning
482-487	Hijau kebiruan	Jingga
487-493	Biru-Hijau	Merah-Jingga
493-498	Biru kehijauan	Merah
498-530	Hijau	Merah-Ungu
530-559	Kuning kehijauan	Merah keunguan
559-571	Kuning-Hijau	Ungu
571-576	Hijau kekuningan	Ungu
576-580	Kuning	Biru
580-587	Kuning kejinggaan	Biru
587-597	Jingga	Hijau kebiruan
597-617	Merah kejinggaan	Biru-Hijau
617-780	Merah	Biru-Hijau

Pengukuran konsentrasi cuplikan didasarkan pada hukum *Lambert-Beer*, yang menyatakan hubungan antara banyaknya sinar yang diserap sebanding dengan konsentrasi unsur dalam cuplikan, dengan persamaan (16) sebagai berikut :

$$A = \log I/I_0 \text{ atau } A = a.b.c \quad (16)$$

dengan

A : absorbansi

a : koefisien serapan molar

b : tebal media cuplikan yang dilewati sinar

c : konsentrasi unsur dalam larutan cuplikan

I_0 : intensitas sinar mula-mula

I : intensitas sinar yang diteruskan.

Aplikasi rumusan tersebut dalam pengukuran kuantitatif dilaksanakan dengan cara komparatif menggunakan kurva kalibrasi dari hubungan konsentrasi deret larutan standar dengan nilai absorbansinya. Konsentrasi cuplikan ditentukan dengan substitusi nilai absorban cuplikan ke dalam persamaan regresi dari kurva kalibrasi (Fatimah *et al.*, 2009).

2.6 Analisis Radioaktivitas

Radioktivitas zat radioaktif dapat ditentukan dengan cara pencacahan aktivitas dari radiasi α , β , γ yang dipancarkan oleh zat radioaktif tersebut. Dalam deteksi radiasi dikenal istilah laju cacah biasanya dinyatakan dalam satuan cacah per detik Becquerel atau sering kali dinyatakan dalam disintegrasi per detik (dps). Harga laju cacah sama sekali tidak mencerminkan aktivitas yang sesungguhnya dari suatu sumber. Namun aktivitas dapat dipengaruhi oleh laju cacah, efisiensi deteksi dan harga intensitas mutlak untuk tenaga sinar gamma yang diukur (Nuraini *et al.*, 2007).

Menurut Nuraini *et al.* (2007) radioaktivitas gross α , β , γ dapat dihitung menggunakan persamaan (17) dan A sesuai persamaan (18).

$$R_{agross} = \frac{A}{M} \quad (17)$$

dengan

R_{agross} : Aktivitas gross (Bq/gr)

A : Aktivitas (Bq)

M : Massa cuplikan (gram)

$$A = \frac{cps_n}{\eta} \quad (18)$$

dengan

η : efisiensi alat

cps_n : cacah netto cuplikan = N

N : $N_1 - N_2$

N_1 : cacah cuplikan + latar

N_2 : cacah latar



BAB 5

PENUTUP

5.1 SIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik simpulan bahwa sebagai berikut :

1. Plat Al-Al merupakan plat yang paling efektif dengan efisiensi penyisihan sebesar 98,06% pada waktu 5 menit serta konsumsi elektroda dan energi terendah berturut-turut sebesar $5,95 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ dan $117,20 \text{ kWh/m}^3$ pada tegangan tetap 2 V.
2. Besar tegangan yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi dalam penelitian ini yaitu sebesar 2 V.
3. Waktu kontak yang dibutuhkan untuk untuk menurunkan kadar thorium pada proses elektrokoagulasi dalam penelitian ini yaitu selama 5 menit.

5.2 SARAN

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Perlu diteliti pengaruh pasivitas elektroda dan hubungannya terhadap pH, mengingat pada penelitian ini pasivitas mempengaruhi hasil efisiensi penyisihan thorium.
2. Perlu diteliti pengaruh hambatan, mengingat pada penelitian ini hambatan juga mempengaruhi besar tegangan dan kuat arus yang digunakan dalam proses.
3. Perlu pengolahan lebih lanjut untuk endapan yang dihasilkan selama proses.
4. Perlu dibuat interval waktu yang lebih singkat (setiap 30 detik) mengingat pada penelitian ini efisiensi penyisihan dan pH meningkat secara signifikan pada waktu 5 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamovic, S., M. Prica, B. Dalmacija, S. Rapajic, D. Novakovic, Z. Pavlovic, & S. Maletic. 2016. Feasibility of Electrocoagulation/Flotation Treatment of Waste Offset Printing Developer Based On The Response Surface Analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 9: 152-162.
- Aisyah. 2014. Pemanfaatan Abu Layang Sebagai Bahan Pembentuk Gelas pada Vitrifikasi Limbah Cair Tingkat Tinggi. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah (Journal of Waste Management Technology)*, 17: 1-12.
- Akyol, A., O.T. Can, E. Demirbas, & M. Kobya. 2013. A Comparative Study of Electrocoagulation and Elektro-Fenton for Treatment of Wastewater from Liquid Organic Fertilizer Plant. *Separation and Purification Technology Journal*, 112: 11-29.
- Amin, A. 2009. Pemisahan Unsur Samarium dan Yttrium dari Mineral Tanah Jarang dengan Teknik Membran Cair Berpendukung (Supported Liquid Membrane). *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 7(1): 15-23.
- Ashari, D. Budianta, & D. Setiabudidaya. 2015. Efektivitas Elektroda pada Proses Elektrokoagulasi untuk Pengolahan Air Asam Tambang. *Jurnal Penelitian Sains MIPA Universitas Sriwijaya*, 17: 45-50.
- Athiyah, U. 2010. *Penyerapan Uranium dengan Pengkompleks Na_2CO_3 Menggunakan Resin Amberlite IRA-400 Cl dan Imobilisasi dengan Resin Epoksi*. Skripsi. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Atmawinata, A., F. Yahya, S. Widhianto, Roosmariharso, D. Irianto, A. Adlir, Y. Susilo, W. Radjid, Massaruddin, D. Noviansyah, A.I. Sutjiatmo, Shinta, S. Wuri, B.P. Sutjiatmo, & Ardhana. 2014. *Telaah Penguatan Struktur Industri Pemetaan Potensi Logam Tanah Jarang di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.
- Bazrafshan, E., K.A. Ownaghi, & A.H. Mahvi. 2012. Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes for Fluoride Removal from Aqueous Environment. *E-Journal of Chemistry*, 9(4): 2297-2308.
- Binnemans, K., Y. Pontikes, P.T. Jones, T.V. Gerven, & B. Blanpain. 2013. Recovery of Rare Earths from Industrial Waste Residues: A Concise Review. *Proceedings of the Third International Slag Valorisation Symposium*. Belgium: Leuven.
- Bintarti, A.N., E.H.B. Bambang, & M.V. Purwani. 2002. Ekstraksi untuk Memisahkan Unsur-Unsur Dalam Konsentrat Logam Tanah Jarang dari Pasir Senotim. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. Yogyakarta: BATAN.

- Cerqueira, A.A. & M.R. Marques. 2012. *New Technologies in the Oil and Gas Industry*. Brazil: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Clark, B.J. 1993. *UV Spectroscopy Techniques, Instrumentation, Data Handling*. London: Chapman & Hall.
- Daneshvar, N., A. Habib, & R. Rohan. 2002. Pretreatment of Brackish Water Using DC-Electrocoagulation Method and Optimization. *Journal Chemistry & Chemistry Engineering*, 2(1): 13-20.
- Dian, A., Yanlinastuti, Noviarty, & Masrukan. 2012. Analisis Zr Dalam Paduan UZr (6%) Melalui Pengukuran Senyawa Zr-Arsenazo III Menggunakan Spektrofotometri UV-Vis. *Urania*, 18(2): 59-119.
- Egorov, N., N. Dyachenko, D. Akimov, A. Kiselev, K. Obmuch, & S. Chalov. 2014. Influence of Adding Ammonium Bifluoride When Leaching Monazite Using Sulphur Acid. *Procedia Chemistry*, 10: 168-172.
- El-aziz, M.M.A. & M.A. Khalifa. 2016. Electrochemistry and Radioactive Waste: A Scientific Overview. *Journal of the Turkish Chemical Society*, 3(1): 47-74.
- Elnenay, A.M.H., E. Nassef, G.F. Malash, & M.H.A. Magid. 2016. Treatment of Drilling Fluids Wastewater by Electrocoagulation. *Egyptain Journal of Petroleum*, 5:1-6.
- Ewing, G.W. 1985. *Instrumental Methods of Chemical Analysis*. America: McGraw-Hill, Inc.
- Fatimah, S., I. Haryati, & A. Jamaludin. 2009. *Pengaruh Uranium terhadap Analisis Thorium menggunakan Spektrofotometer UV-Vis*. Makalah dipresentasikan pada Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir, BATAN Yogyakarta, 5 November.
- Gunandjar, T. Sundari, & Y. Purwanto. 2015. Imobilisasi Limbah Radioaktif Uranium Menggunakan Abu Batubara Sebagai Bahan Matriks Synroc. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan*. Yogyakarta: BATAN.
- Gunandjar, T. Sundari, & Y. Purwanto. 2016. Imobilisasi Limbah Radioaktif dari Produksi Radioisotop Molibdenum-99 (^{99}Mo) Menggunakan Bahan Matriks Synroc Titanat. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan*. Yogyakarta: BATAN.
- Hafni, L.N., R. Faizal, W. Sugeng, S. Budi, S. Arif, & Susilaningtyas. 2000. Pengolahan Monasit dari Limbah Penambangan Timah: Pemisahan Logam Tanah Jarang (RE) dari U dan Th. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir-V*. Yogyakarta: BATAN.

- Hanum, F., R. Tambun, M.Y. Ritonga, & W.W. Kasim. 2015. Aplikasi Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(\$): 13-17.
- Hendrawati, D. Syamsumarsih, & Nurhasni. 2013. Penggunaan Biji Asam Jawa (*Tamarindus indica* L.) dan Biji Kecipir (*Psophocarpus tetragonolobus* L.) Sebagai Koagulan Alami Dalam Perbaikan Kualitas Air Tanah. *Jurnal Valensi*, 3(1): 23-34.
- Herman, D.Z. 2009. Tinjauan Kemungkinan Sebaran Unsur Tanah Jarang (REE) di Lingkungan Panas Bumi. *Jurnal Geologi Indonesia*, 4(1): 1-8.
- Hu, C.Y., S.L. Lo, & W.H. Kuan. 2003. Effects of Co-Existing Anions On Fluoride Removal in Electrocoagulation (EC) Process Using Aluminum Electrodes. *Water Research*, 37: 4513-4523.
- Iqbal, S.A. & I. Zaafrani. 2011. *Textbook of Electrochemistry*. New Delhi: Shree Balaji Art Press.
- Irianto, B., Muljono, & Suprihati. 2012. Penentuan Konsentrasi Torium-232 dan Anak Luruhnya secara Spektrometer Alpa. *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*. Yogyakarta: BATAN.
- Jamaludin, A. & D. Adiantoro. 2012. Analisis Kerusakan X-Ray Fluorescence (XRF). *ISSN 1979-2409 09-10*.
- Kartika, Y., A.S. Panggabean, & R. Gunawan. 2015. Penurunan Kadar Ion Logam Kromium pada Limbah Industri Sarung Samarinda dengan menggunakan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Kima Mulawarman*, 13(1): 45-49.
- Khandegar, V. & A. K. Saroha. 2013. Electrocoagulation for The Treatment of Textile Industry Effluent-A Review. *Journal of Environmental Management*, 128: 949-963.
- Kobyas, M., O.T. Can, & M. Bayramoglu. 2003. Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation Using Iron and Aluminium Electrodes. *Journal of Hazardous Material*, B100: 163-178.
- Kobyas, M., F. Ulu, U. Gebologlu, E. Demirbas, & M. S. Oncel. 2011. Treatment of Potable Water Containing Low Concentration of Arsenic With Electrocoagulation: Different Connection Modes and Fe-Al Electrodes. *Separation and Purification Technology*, 77: 283-293.
- Kobyas, M., E. Dermirbas, M.S. Oncel, Y. Yildirim, E. Sik, A.Y. Goren, & A. Akyol. 2014. Modeling and Optimization of Arsenite Removal from Groundwater Using Al Ball Anodes by Electrocoagulation Process. *Journal of Selcuk University Natural and Applied Sciences Online ISSN: 2147-3781 803-811*.

- Kriswarini, R., D. Anggraini, & K. Djoko. 2007. Pengujian Kemampuan XRF untuk Analisis Komposisi Unsur Paduan Zr-Sn-Cr-Fe-Ni. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*. Bandung: BATAN.
- Kriswarini, R. D. Anggraini, & A. Djamaludin. 2010. *Validasi Metoda XRF (X-Ray Fluorescence) Secara Tunggal dan Simultan untuk Analisis Unsur Mg, Mn dan Fe dalam Paduan Aluminum*. Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir 18 November Yogyakarta.
- Kurniasih, R.F., R. Gunawan, & A.S. Panggabean. 2016. Aplikasi Metode Elektrokoagulasi terhadap Penurunan Kadar Ion Logam Fe dan Mn, Kekeruhan serta Warna pada Pengolahan Air Gambut secara Batch. *Jurnal Atomik*, 1(1): 42-46.
- Lekhlif, B., L. Oudrhiri, F. Zidane, P. Drogui, & J.F. Blais. 2014. Study of the Electrocoagulation of Electroplating Industry Wastewaters Charged by Nickel (II) and Chromium (VI). *Journal Material Environment Sciences*, 5(1): 111-120.
- Li, B., N. Wang, J. Wan, S. Xiong, H. Liu, S. Li, & R. Zhao. 2016. In-Situ Gamma-Ray Survey of Rare Earth Tailings Dams - A Case Study in Baotou and Bayan Obo District, China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151: 304-310.
- Liu, Z., D. Stromberg, X. Liu, W. Liao, & Y. Liu. 2015. A New Multiple-Stage Electrocoagulation Process on Anaerobic Digestion Effluent Simultaneously Reclaim Water and Clean Up Biogas. *Journal of Hazardous Materials*, 285: 483-490.
- Long, K.R., B.S. Gosen, N.K. Foley, & D. Cordier. 2010. *The Principal Rare Earth Element Deposits of the United States - A Summary of Domestic Deposits and A Global Perspective*. United States: USGS.
- Masrukhan, T. Yulianto, & A. Muchsin. 2011. Komparasi Hasil Analisis Komposisi Kimia di dalam Paduan U-Zr-Nb Dengan Menggunakan Teknik XRF dan AAS. *Urania*, 17(3): 116-181.
- Milanese, L., A. Sassolini, O. Cenciarelli, A. Malizia, P. Ventura, M. Chiappini, S. Chiappini, M. Carestia, D.D. Giovanni, V. Gabbarini, G.M. Ludovici, L. Palombi, C. Bellecci, & P. Gaudio. 2016. Evaluation of Hand-Held Gamma Spectrometry Instrument as Confirm Technique for Environment Analysis of Thorium in Soil. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(4): 3388-3394.
- Mirvakili, S.M., M.A. Kavafshary, & A.J. Vaziri. 2015. Comparison of Neutronic Behavior of UO_2 , $(\text{Th}^{233}\text{U})\text{O}_2$ and $(\text{Th}^{235}\text{U})\text{O}_2$ Fuels in A Typical Heavy Water Reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 47: 315-322.
- Mollah, M.Y.A., R. Schennach, J.R. Parga, & D.L. Cocke. 2001. Electrocoagulation (EC) - Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials*, B84: 29-41.

- Nasution, M.A., Z. Yaakob, E. Ali, N.B. Lan, & S.R.S. Abdullah. 2013. A Comparative Study Using Aluminium and Iron Electrodes for the Electrocoagulation of Palm Oil Mill Effluent to Reduce its Polluting Nature and Hydrogen Production Simultaneously. *Pakistan Journal Zoologi*, 45(2): 331-337.
- Ngadenin, H. Syaeful, K.S. Widana, & M. Nurdin. 2014. Potensi Thorium dan Uranium di Kabupaten Bangka Barat. *Eksplorium*, 35(2): 69-84.
- Noviarty & D. Anggraini. 2013. Analisis Neodimium Menggunakan Metoda Spektrofotometri UV-Vis. *ISSN 1979-2409 BATAN*, 11: 9-17.
- Nugraheni, A., P. Dwijananti, & Sayono. 2012. Penentuan Aktivitas Unsur Radioaktif Thorium yang Terkandung Dalam Prototipe Sumber Radiasi Kaos Lampu Petromaks. *Jurnal MIPA*, 35(1): 31-37.
- Nuraini, E., Sunardi, & B. Irianto. 2007. Analisis Radioaktivitas Gross α , β dan Identifikasi Radionuklida Pemancar γ dari Air dan Sedimen Sungai Code Yogyakarta. *Prosiding PPI – PDIPTN*. Yogyakarta: BATAN.
- Prayitno & E. Kismolo. 2012. Percobaan Awal Proses Elektrokoagulasi Sebagai Metode Alternatif pada Pengolahan Limbah Cair. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. Yogyakarta: BATAN.
- Prayitno, V. Ridantami, & I. Prayogo. 2016. Reduksi Aktivitas Uranium dalam Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Proses elektrokoagulasi. *Urania*, 22(3): 133-202.
- Picard, T., G. Cathalifaud-Feuillade, M. Mazet, & C. Vandensteendam. 2000. Cathodic Dissolution in The Electrocoagulation Process Using Aluminium Electrodes. *Journal of Environmental Monitoring*, 2: 77-80.
- Rachmawati, B., Y. Surya, & M. Mirwan. 2014. Proses Elektrokoagulasi Pengolahan Limbah Laundry. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 6: 15-22.
- Ridantami, V., B. Wasito, & Prayitno. 2016. Pengaruh Tegangan dan Waktu Pada Pengolahan Limbah Radioaktif Uranium dan Torium Dengan Proses Elektrolisis. *Jurnal Forum Nuklir*, 12(2): 102-107.
- Saadah, K. & S.E. Kusuma. 2014. Kebijakan Cina Membatasi Ekspor Logam Tanah Jarang (LTJ) ke Amerika Serikat. *E-SOSPOL*, 1(1): 46-60.
- Said, N. I. 2010. Metoda Penghilangan Logam Berat (As, Cd, Cr, Ag, Cu, Pb, Ni dan Zn) di Dalam Air Limbah Industri. *Jurnal Air Indonesia*, 6(2): 136-148.
- Salimin, Z. & J. Rachmadetin. 2010. Denitrifikasi Limbah Radioaktif Cair yang Mengandung Asam Nitrat dengan Proses Biooksidasi. *Prosiding Seminar*

Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX. Yogyakarta: BATAN.

- Snyder, M. K. 1966. *Chemistry Structure and Reaction*. America: Holt, Rinehart and Winstron, Inc.
- Strelow, F.W.E., M.L. Kokot, T.N.V.D. Walt, & B. Bhaga. 2000. Rationalized Determination of Uranium in Rocks for Geochemical Prospecting Using Separation by Ion Exchange Chromatography and Spectrophotometry with Arsenazo III. *Joernal Van Die Suid-Afrikaanse Chemiese Instituut*, XXIX: 97-104.
- Suprpto, S.J. 2008. *Tinjauan Tentang Unsur Tanah Jarang*. Makalah Penelitian Pusat Sumber Daya Geologi.
- Susanto, Ricky. 2008. *Optimasi Koagulasi-Flokulasi dan Analisis Kualitas Air Pada Industri Semen*. Skripsi. Jakarta : Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Susetyaningsih, R., E. Kismolo & Prayitno. 2008. *Kajian Proses Elektrokoagulasi untuk Pengolahan Limbah Cair*. Seminar Nasional IV Teknologi Nuklir BATAN 25-26 Agustus Yogyakarta.
- Syahfitri, W.Y.N., S. Kurniawati, N. Adventini, D.D. Lestiani, & E. Damastuti. 2013. Aplikasi AAN dan XRF dalam Uji Homogenitas Kandidat Bahan Acuan Bottom Ash. *Prodising Seminar Nasional TAN*. Yogyakarta: BATAN.
- Thirugnanasambandham, K., V. Sivakumar, & J.P. Maran. 2013. Optimization of Electrocoagulation Process to Great Biologically Pretreated Bagasse Effluent. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 78: 613-626.
- Tian, Y., W. He, X. Zhu, N. Ren, & B.E. Logan. 2016. Energy Efficient Electrocoagulation Using An Air-Breathing Cathode to Remove Nutrients from Wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 292: 308-314.
- Trapsilasiwi, K.R & A.F. Assomadi. 2010. *Aplikasi Elektrokoagulasi menggunakan Pasangan Elektroda Alumunium untuk Pengolahan Air dengan Sistem Kontinyu*. Makalah Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS.
- Voxpopulindo. 2016. Menperin Pembangkit Listrik Tenaga Thorium Jadi Terobosan Energi. www.voxpopulindo.com [diakses tanggal 23 Agustus 2017].
- Wahyulis, N.C., I. Ulfin, & Harmami. 2014. Optimasi Tegangan pada Proses Elektrokoagulasi Penurunan Kadar Kromium dari Filtrat Hasil Hidrolisis Limbah Padat Penyamakan Kulit. *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, 3(2): 2337-3520.
- Wasito, B. & D. Biyantoro. 2009. *Optimasi Proses Pembuatan Oksida Logam Tanah Jarang dari Pasir Senotim dan Analisis Produk dengan Spektrometer Pendar*

Sinar-X. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir 5 November Yogyakarta.

- Wilis, R. 1989. *Kimia Inti*. Jakarta: Proyek Pengembangan Pendidikan Tenaga Kependidikan.
- Xie, F., T.A. Zhang, D. Dreisinger, & F. Doyle. 2014. A Critical Review on Solvent Extraction of Rare Earth from Aqueous Solutions. *Mineral Engineering*, 56: 10-28.
- Yen, T. F. 1999. *Environmental Chemistry: Chemical Principles for Environmental Processes Volume 4B*. America: Prentice Hall PTR Environmental Management & Engineering Series.
- Yuliani, I., Alimuddin, & E. Akkas. 2017. Penurunan BOD dan TSS Pada Limbah Industri Saus Secara Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Fe, Cu dan Stainless. *Jurnal Atomik*, 2(1): 134-139.
- Zaleschi, L., C. Teodosiu, I. Cretescu, & M. A. Rodrigo. 2012. A Comparative Study of Electrocoagulation and Chemical Coagulation Processes Applied for Wastewater Treatment. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(8): 1517-1525.
- Zhu, Z., Y. Pranolo, & C.Y. Cheng. 2015. Separation of Uranium and Thorium from Rare Earth for Rare Earth Production - A Review. *Mineral Engineering*, 77: 185-196.