

**PENGARUH PENAMBAHAN AGEN PENGKELAT PADA
PELINDIAN BIJIH EMAS TAMBANG LENGKUKAI
KABUPATEN TANGGAMUS MENGGUNAKAN
KOMBINASI REAGEN TIOSIANAT
DAN TIOUREA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik
Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

INDRIA SYAFITRI
3334170029

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN**

2023

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN AGEN PENGKELAT PADA
PELINDIAN BIJIH EMAS TAMBANG LENGKUKAI
KABUPATEN TANGGAMUS MENGGUNAKAN
KOMBINASI REAGEN TIOSIANAT
DAN TIOUREA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh :

Pembimbing I



Soesaptri Oediyani, Ir., M.E.
NIP. 196006232003122001

Pembimbing II



Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.
NIP. 198304052008011008

LEMBAR PERSETUJUAN
PENGARUH PENAMBAHAN AGEN PENGKELAT PADA
PELINDIAN BIJIH EMAS TAMBANG LENGKUKAI
KABUPATEN TANGGAMUS MENGGUNAKAN
KOMBINASI REAGEN TIOSIANAT
DAN TIOUREA


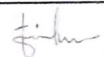

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Indria Syafitri

3334170029

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal:

Susunan Dewan Penguji		Tanda Tangan
Penguji I	: Ir. Soesaptri Oediyani, M.E.	 _____
Penguji II	: Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T.	 _____
Penguji III	: Bening Nurul H.K, S.T., M.T.	 _____

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc.

NIP. 197804102003121001

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini Saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : PENGARUH PENAMBAHAN AGEN PENGKELAT
PADA PELINDIAN BIJIH EMAS TAMBANG
LENGKUKAI KABUPATEN TANGGAMUS
MENGUNAKAN KOMBINASI REAGEN
TIOSIANAT DAN TIOUREA

Nama Mahasiswa : Indria Syafitri

NIM : 3334170029

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli Saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya Saya, maka Saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja Saya nyatakan melalui lembar pernyataan.

Cilegon, Juni 2023



Indria Syafitri

NIM. 3334170029

ABSTRAK

Sekitar sepertiga produksi emas dunia merupakan bijih emas refraktori. Pengolahan bijih ini tidak dianjurkan menggunakan proses sianidasi karena dapat menurunkan persen ekstraksi emas hingga 50%, sehingga dilakukan penelitian menggunakan reagen alternatif yaitu kombinasi tiourea dan tiosianat yang memiliki efek sinergis dan mampu meningkatkan perolehan emas lebih tinggi. Namun tingginya dekomposisi tiourea karena adanya oksidator menjadi masalah utama dalam penggunaannya secara komersil. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan asam sitrat dan asam asetat dalam kombinasi larutan pelindian tiosianat dan tiourea terhadap persen ekstraksi emas. Bahan baku yang digunakan adalah bijih emas dari Tambang Lengkuai yang merupakan jenis bijih emas refraktori. Kondisi pelindian dilakukan pada variabel tetap konsentrasi tiosianat 0,05 M, temperatur 35°C, pH 1,5, dan kecepatan pengadukan 250 rpm. Sedangkan variasi yang digunakan adalah tiourea 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 M, lalu feri sulfat sebagai oksidator 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; dan 0,005 M. Kemudian variasi asam sitrat dan asam asetat sebagai agen pengkelat yang digunakan adalah 0,0015; 0,003; dan 0,006 M. Pada pelindian ini didapatkan hasil persen ekstraksi emas tertinggi pada penambahan asam sitrat dan asam asetat 0,006 M yaitu masing-masing sebesar 84,04% dan 83,5%. *Shrinking core model* digunakan untuk menentukan kinetika proses dengan pengendali laju reaksi adalah difusi lapisan abu didapatkan nilai energi aktivasi sebesar 16,99 kJ/mol.

Kata kunci: agen pengkelat, bijih emas tambang lengkuai, oksidator, tiourea, tiosianat.

ABSTRACT

About one-third of the world's gold production is refractory gold ore. Processing of these ores is not recommended using the cyanidation process because it can reduce the percentage of gold extraction by up to 50%, research is carried out using alternative reagents, namely the combination of thiourea and thiocyanate, which has a synergistic effect and is able to increase gold recovery higher. However, the high decomposition of thiourea due to the presence of oxidizers is a major problem in its commercial use. This study aims to determine the effect of the addition of citric acid and acetic acid in the combination of thiocyanate and thiourea leaching solutions on the percentage of gold extraction. The raw material used is gold ore from the Lengkokai Mine, a type of refractory gold ore. Leaching conditions were carried out on fixed variables of thiocyanate concentration of 0.05 M, temperature 35°C, pH 1.5, and stirring speed 250 rpm. While the variations used were thiourea 0.02; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2 M, then ferric sulfate as oxidizer 0.001; 0.002; 0.003; 0.004; and 0.005 M. Then the variations of citric acid and acetic acid as chelating agents used were 0.0015; 0.003; and 0.006 M. In this leaching, the highest percentage of gold extraction was obtained in the addition of citric acid and acetic acid 0.006 M, which amounted to 84.04% and 83.5%, respectively. Shrinking core model was used to determine the kinetics of the process with the reaction rate controller being the diffusion of the ash layer with an activation energy value of 16.99 kJ/mol.

Keyword: *chelating agents, gold ore of lengkokai mines, thiourea, thiocyanate*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Agen Pengkelat Pada Pelindian Bijih Emas Tambang Lengkuai Kabupaten Tanggamus Menggunakan Kombinasi Reagen Tiosianat Dan Tiourea” dengan baik. Proses penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan beberapa pihak dan pada kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan dan Koordinator Skripsi Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Ir. Soesaptri Oediyani, M.E. selaku pembimbing I dan Bapak Fika Rofiek Mufakhir, S.T., M.T. selaku pembimbing II.
3. Orang tua penulis yaitu Bapak Syafri dan Ibu Fitri yang selalu memberikan doa dan dukungannya.
4. Staf Peneliti dan karyawan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung.
5. Keluarga besar Teknik Metalurgi 2017 Universitas Sultan Ageng Tirtayasa serta pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan dan membantu Penulis dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Karena itu, Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga Skripsi ini menjadi lebih baik lagi dan bermanfaat bagi penulis serta pembaca yang memerlukannya sebagai bahan kajian maupun sumber referensi. Atas perhatiannya, Penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, 8 Juni 2023

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Bijih Emas Tanggamus.....	6
2.2 Reagen Pelindian.....	7
2.2.1 Tiosianat.....	7

2.2.2	Tiourea	9
2.3	Pelindian Dual Reagen	10
2.3.1	Pengaruh Konsentrasi Tiourea	11
2.3.2	Pengaruh Konsentrasi Tiosianat	13
2.3.3	Pengaruh Konsentrasi Oksidator	14
2.4	Kinetika Pelindian	16
2.5	Agen Pengkelat	18

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	22
3.2	Alat dan Bahan	24
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan	24
3.2.2	Bahan-bahan yang Digunakan	24
3.3	Prosedur Penelitian	25
3.3.1	Preparasi Sampel	25
3.3.2	Percobaan Pelindian	25
3.4	Metode Analisis	26

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakterisasi Bijih Emas Tanggamus	28
4.2	Pengaruh Konsentrasi Tiourea	30
4.3	Pengaruh Konsentrasi Oksidator	32
4.4	Pengaruh Agen Pengkelat	34
4.5	Kinetika Pelindian	35
4.5.1	Model Kinetika	35

4.5.2 Energi Aktivasi	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	37
5.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA.....	38
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A Contoh Perhitungan.....	40
LAMPIRAN B Data Hasil Penelitian	42
LAMPIRAN C Gambar Alat dan Bahan	45

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Laju Pelindian Emas dengan Variasi Tiosianat dan Tiourea.....	11
Tabel 2.2 <i>Grouping of Chelating Agents</i>	17
Tabel 4.1 Hasil Analisis XRF dan ICP-OES Bijih Emas Tanggamus	26
Tabel B.1 Data Persen Ekstraksi Au Variasi Tiourea	40
Tabel B.2 Data Persen Ekstraksi Cu Variasi Tiourea	40
Tabel B.3 Data Persen Ekstraksi Au Variasi Oksidator.....	41
Tabel B.4 Data Persen Ekstraksi Cu Variasi Oksidator	41
Tabel B.5 Data Persen Ekstraksi Au Variasi Asam Sitrat.....	41
Tabel B.6 Data Persen Ekstraksi Cu Variasi Asam Sitrat	42
Tabel B.7 Data Persen Ekstraksi Au Variasi Asam Asetat	42
Tabel B.8 Data Persen Ekstraksi Cu Variasi Asam Asetat	42
Tabel B.9 Koefisien Korelasi Pengendali Laju Reaksi.....	42
Tabel B.10 Hubungan $\ln K$ terhadap $1/T$	42
Tabel B.11 Perhitungan Energi Aktivasi	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Tipe Bijih Emas Berdasarkan Respon Terhadap Sianidasi.....	8
Gambar 2.2 Diagram Eh-pH Sistem Au-SCN-H ₂ O	9
Gambar 2.3 Diagram Eh-pH pada sistem Fe-SCN-H ₂ O	9
Gambar 2.4 Diagram Eh-pH Sistem SCN-H ₂ O	10
Gambar 2.5 Pengaruh Konsentrasi Tiourea terhadap Persen Ekstraksi Emas	11
Gambar 2.6 Pengaruh Temperatur Pelindian Terhadap Persen Ekstraksi	12
Gambar 2.7 Perbandingan Pelindian dengan Penggunaan Reagen Tiourea, Tiosianat, dan Kombinasi Tiourea-Tiosianat terhadap Kadar Emas yang Terlarut.....	12
Gambar 2.8 Pengaruh Konsentrasi Feri Sulfat terhadap Persen Ekstraksi Emas	15
Gambar 2.9 Model Kinetika <i>Shrinking Core Model</i>	17
Gambar 2.10 Model Kinetika <i>Shrinking Particle Model</i>	17
Gambar 2.11 Struktur Pengkelat EDTA dan Asam Sitrat	17
Gambar 2.12 Kelarutan Asam Sitrat dalam Air terhadap Temperatur	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 4.1 Hasil Analisis XRD Bijih Emas Tanggamus	29
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Konsentrasi Reagen Terhadap Persen Ekstraksi	31
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Konsentrasi Feri Sulfat Terhadap Persen Ekstraksi	32
Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat terhadap Persen Ekstraksi.....	35

Gambar 4.5	Pengaruh Konsentrasi Asam Asetat terhadap Persen Ekstraksi	35
Gambar 4.6	Grafik Perbandingan Semua Variasi dengan Perolehan Persen Ekstraksi Au Tertinggi.....	37
Gambar 4.7	Koefisien Korelasi Difusi Film dan Difusi Lapisan Abu	38
Gambar 4.8	Koefisien Korelasi Reaksi Kimia dan Difusi Film <i>Shrinking Particle Model</i>	39
Gambar 4.9	Skematik <i>Shrinking Core Model</i> Pada Pelindian Bijih Emas Menggunakan Tiosianat dan Tiourea	41
Gambar 4.10	Grafik Hubungan $\ln k$ terhadap $1/T$	42
Gambar C.1	Ayakan.....	47
Gambar C.2	Corong	47
Gambar C.3	Erlenmeyer	47
Gambar C.4	Gelas Beker.....	47
Gambar C.5	Gelas Ukur	47
Gambar C.6	<i>Magnetic Stirrer</i>	47
Gambar C.7	<i>Hot Plate</i>	48
Gambar C.8	Labu Ukur	48
Gambar C.9	Kertas Saring.....	48
Gambar C.10	Termometer.....	48
Gambar C.11	<i>Oven</i>	48
Gambar C.12	pH Meter.....	48
Gambar C.13	XRF	48
Gambar C.14	XRD.....	48
Gambar C.15	ICP-OES	49
Gambar C.16	Feri Sulfat	50

Gambar C.17 Asam Sitrat.....	50
Gambar C.18 Asam Asetat.....	50
Gambar C.19 Sodium Tiosianat.....	50
Gambar C.20 Tiourea.....	50
Gambar C.21 Asam Sulfat 98%.....	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki cadangan emas terbesar kelima di dunia yaitu sekitar 2.600 ton Au dengan total cadangan bijih 3.565,7 juta ton. Selain itu Indonesia merupakan produsen tambang emas urutan 6 dunia (ESDM,2020). Sekitar sepertiga produksi emas dunia berupa bijih emas refraktori (Handayani dan Suratman, 2017), diantaranya adalah bijih emas yang terdapat di tambang Lengkulai, Kabupaten Tanggamus. Proses pengolahan emas yang diterapkan secara komersial adalah dengan proses sianidasi. Namun proses sianidasi ini tidak efektif dilakukan pada bijih refraktori dan secara drastis menurunkan perolehan emas hingga di bawah 50% dan konsumsi reagen yang tinggi. Limbah proses ini juga memerlukan pengolahan lebih lanjut karena memiliki toksisitas yang tinggi jika langsung dibuang ke lingkungan (Handayani dan Suratman, 2017). Oleh karena itu dilakukan berbagai penelitian mencari reagen alternatif untuk ekstraksi emas, diantaranya adalah penggunaan reagen tiosianat dan tiourea. Penambahan tiourea ke dalam larutan tiosianat terbukti memiliki efek sinergis yang memberikan keunggulan signifikan pada proses pelarutan emas (Yang et Al, 2011).

Tiosianat merupakan reagen yang ramah lingkungan dan lebih stabil dalam lingkungan asam (pH 1,0-2,0). Namun proses pelindian dengan reagen ini lebih lambat daripada sianida. Sebaliknya, penggunaan tiourea menghasilkan proses pelindian yang

lebih cepat dibandingkan sianida dan memiliki toksisitas yang jauh lebih rendah serta selektivitas pelindian yang baik. Namun tiourea mudah terdekomposisi karena adanya oksidator sehingga menyebabkan konsumsi reagen yang cukup tinggi (Li et Al, 2006). Tingginya konsumsi reagen tiourea sebagian besar terjadi karena keberadaan ion feri (Fe^{3+}). Hal ini dapat dikurangi dengan penggunaan senyawa yang dapat membentuk kompleks dengan ion feri (Kenna, 1991). Asam sitrat dan asam asetat adalah dua senyawa yang bisa digunakan sebagai agen pengkelat untuk membentuk kompleks dengan ion feri.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi tiourea dan konsentrasi feri sulfat sebagai oksidator, serta pengaruh penambahan asam sitrat dan asam asetat dalam pelindian menggunakan kombinasi reagen tiosianat dan tiourea terhadap perolehan persen ekstraksi emas. Penelitian ini juga dilakukan untuk mengetahui dan menemukan kondisi terbaik untuk proses ekstraksi emas yang sesuai dengan karakteristik bijih emas khususnya yang ada di Tambang Lengkukai, Kabupaten Tanggamus.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian ini, maka identifikasi masalah yang akan ditinjau antara lain:

1. Kombinasi reagen tiosianat dan tiourea memiliki reaksi sinergis yang dapat memberikan banyak keunggulan pada proses pelindian emas dibandingkan hanya dengan satu reagen. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi tiourea dan oksidator untuk mengetahui kondisi terbaik dalam

pelindian menggunakan kombinasi reagen tiosianat dan tiourea.

2. Konsumsi reagen tiourea dapat dikurangi dengan penambahan pengkelat yang dapat membentuk kompleks dengan ion feri. Sehingga degradasi oksidatif yang terjadi pada tiourea oleh ion feri dapat ditekan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh konsentrasi tiourea dan feri sulfat terhadap persen ekstraksi emas dalam pelindian menggunakan reagen kombinasi tiosianat dan tiourea.
2. Mengetahui pengaruh penambahan asam sitrat dan asam asetat sebagai agen pengkelat terhadap persen ekstraksi emas dalam pelindian menggunakan reagen kombinasi tiosianat dan tiourea.
3. Mengetahui model kinetika dan energi aktivasi yang dibutuhkan pada pelindian bijih emas.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini meliputi:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan bijih emas refraktori yang berasal dari Tambang Lengkokai, Kabupaten Tanggamus, Lampung.
2. Karakterisasi sampel dan hasil dengan metode XRD, XRF, dan ICP-OES.
3. Pelindian menggunakan larutan sodium tiosianat, tiourea, dan feri sulfat

sebagai oksidator serta penambahan asam sitrat dan asam asetat sebagai agen pengkelat.

4. Variabel bebas:
 - a. Variasi konsentrasi tiourea: 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; dan 0,2 M
 - b. Variasi konsentrasi feri sulfat: 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; dan 0,005 M
 - c. Variasi Asam sitrat: 0,0015; 0,003; dan 0,006 M
 - d. Variasi Asam sitrat: 0,0015; 0,003; dan 0,006 M
 - e. Variasi temperatur: 35, 45, 55, 65, dan 35 °C
5. Variabel kontrol:
 - a. Kecepatan putaran : 250 rpm
 - b. Konsentrasi tiosianat : 0,05 M
 - c. Temperatur : 35°C
 - d. Waktu pelindian : 6 jam

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini terdiri dari lima bab. Bab I berisi tentang latar belakang dilakukannya penelitian pelindian bijih emas Tanggamus menggunakan reagen kombinasi tiosianat dan tiourea, identifikasi masalah yang merupakan dasar penelitian ini, hipotesis, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan proposal. Pada bab II menjelaskan tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini,

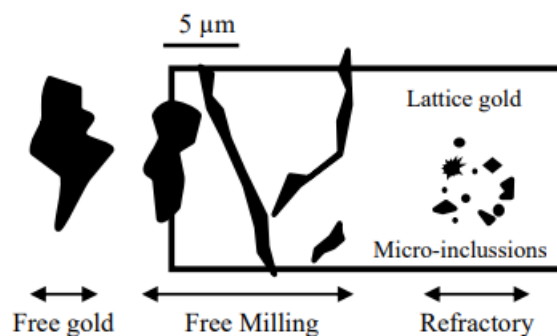
meliputi penjelasan bijih emas Kabupaten Tanggamus, pemanggangan bijih, reagen pelindian, dan pelindian larutan campuran. Bab III terdiri dari metode penelitian yang disajikan dalam diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan saat penelitian, prosedur, serta metode analisis yang akan dilakukan saat penelitian. Kemudian pada bab IV berisi data hasil penelitian beserta penjelasan yang berkaitan dengan variabel penelitian. Bab V berisi kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya. Terakhir terdapat daftar pustaka, dan lampiran yang terdiri dari lampiran perhitungan, data hasil penelitian, serta alat dan bahan yang digunakan selama dilakukannya penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bijih Emas Tanggamus

Secara umum, berdasarkan respon terhadap proses sianidasi bijih emas dapat diklasifikasikan menjadi bijih *free gold*, *free milling*, dan refraktori. Tipe bijih *free gold* dan *free milling* lebih mudah bereaksi dengan sianida membentuk ion emas kompleks (AuCN^-), sehingga sianidasi sangat efektif dilakukan untuk bijih tipe ini namun sebaliknya tidak efektif untuk tipe bijih refraktori (Mufakhir, 2019). Klasifikasi bijih ini dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tipe Bijih Emas Berdasarkan Respon Terhadap Sianidasi

(Mufakhir, 2019)

Bijih emas Tambang Lengkuikai terletak di Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung dengan cadangan bijihnya sekitar 605.927 juta ton. Bijih emas ini memiliki kandungan Au sebesar 4,03 ppm dengan kandungan Si yang dominan diikuti dengan

unsur Fe dan S. Bijih emas Tanggamus merupakan salah satu tipe bijih emas refraktori karena partikel emasnya dilindungi oleh mineral sulfida seperti pirit, kalkopirit, spalerit, dan galena. Kandungan senyawa sulfida di dalam bijih emas cenderung meningkatkan sifat refraktori bijih emas. Keberadaan mineral emas yang terjebak dalam mineral sulfida, menyebabkan mineral tersebut sulit untuk terlarut sehingga mempengaruhi persen ekstraksi emas (Zhou et Al, 2004). Proses sianidasi secara langsung maupun amalgamasi untuk mengolah bijih emas Tanggamus ini tidak dianjurkan karena tidak ekonomis dan Au akan sulit untuk dilarutkan. Bijih emas ini lebih cocok jika diekstraksi melalui proses yang lebih lengkap meliputi kominusi, flotasi, oksidasi, dan pelindian (Mufakhir, 2018).

2.2 Reagen Pelindian

Sianidasi telah menjadi metode yang paling sering digunakan industri logam emas di seluruh dunia. Selama lebih dari seabad lamanya karena prosesnya yang sederhana dan ekonomis. Namun penggunaan sianida sebagai reagen pelindian telah menyebabkan berbagai masalah lingkungan pada tambang emas yang berada di berbagai belahan dunia. Penggunaan sianida untuk ekstraksi bijih emas juga lebih efektif dilakukan pada bijih oksida. Sedangkan sering terjadi masalah pada pelindian bijih emas yang mengandung sulfur, tembaga, mangan, arsenik, dan bijih karbonat, sehingga didapatkan perolehan emas yang rendah.

Menurut Gos and Rubo (2001) ada tiga kriteria penting dalam menentukan reagen alternatif yang efektif untuk proses pelindian yaitu biaya yang murah, toksisitas yang rendah, dan proses reaksi yang cepat dan terukur, sehingga banyak dilakukan

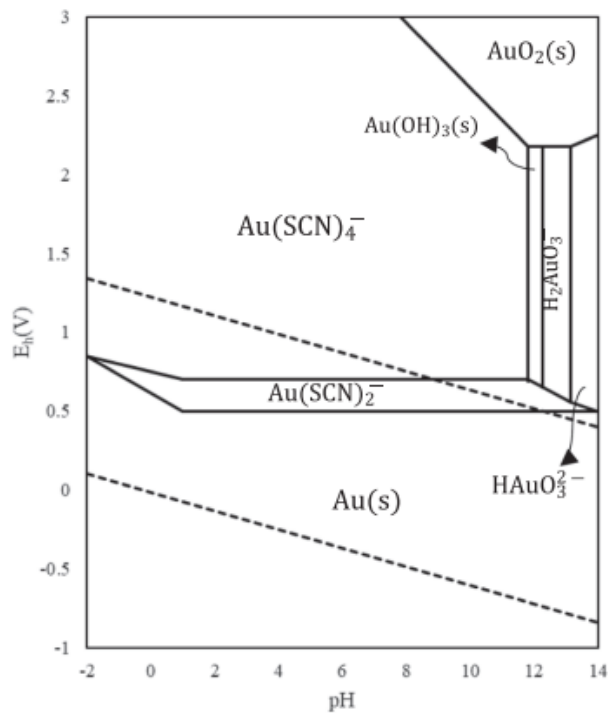
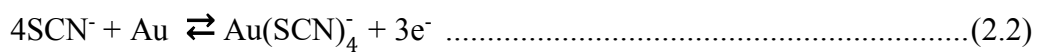
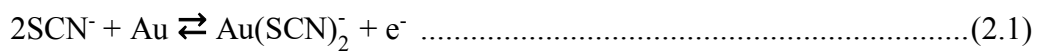
penelitian mengenai reagen alternatif ini untuk mendapatkan reagen pelindian yang toksisitasnya rendah dan memiliki kinetika reaksi yang cepat. Selama beberapa dekade ini, sudah banyak literatur yang membahas mengenai reagen alternatif pelindian emas yang lebih ramah lingkungan untuk menggantikan sianida. Reagen alternatif yang banyak dikembangkan diantaranya adalah larutan tiosianat dan tiourea.

2.2.1 Tiosianat

Tiosianat [SCN⁻] telah dikenal sebagai reagen pelindian bijih emas dalam waktu yang lama. Tiosianat pertama kali diteliti untuk melarutkan emas oleh Fleming pada tahun 1986. Kemudian beberapa studi mengenai laju pelindian dan mekanismenya dipublikasikan oleh Monhemius et al, 1994. Dibandingkan dengan sianida, tiosianat memiliki toksisitas 100 kali lipat lebih rendah dan lebih aman terhadap lingkungan (Pimenta et al, 2010). Lalu dibandingkan dengan tiourea dan tiosulfat, sistem pelindian menggunakan tiosianat memiliki konsumsi reagen yang lebih rendah sehingga biaya operasi menjadi lebih murah. Tiosianat juga memiliki stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan tiourea dalam berbagai media pelindian (Li et Al, 2012).

Pelarutan emas menggunakan tiosianat bergantung pada konsentrasi tiosianat dan potensial oksidasi larutan. *Aurous* (Au(SCN)₂⁻) dan *Auric* (Au(SCN)₄⁻) adalah dua senyawa yang stabil dan dapat larut dalam larutan tiosianat. Dengan konstanta stabilitas senyawa *aurous* dan *auric* masing-masing sebesar 10¹⁷ dan 10⁴² dapat disimpulkan bahwa *auric* jauh lebih stabil dibandingkan dengan *aurous* (Li et al, 2012; Munoz dan Miller, 2000). Reaksi

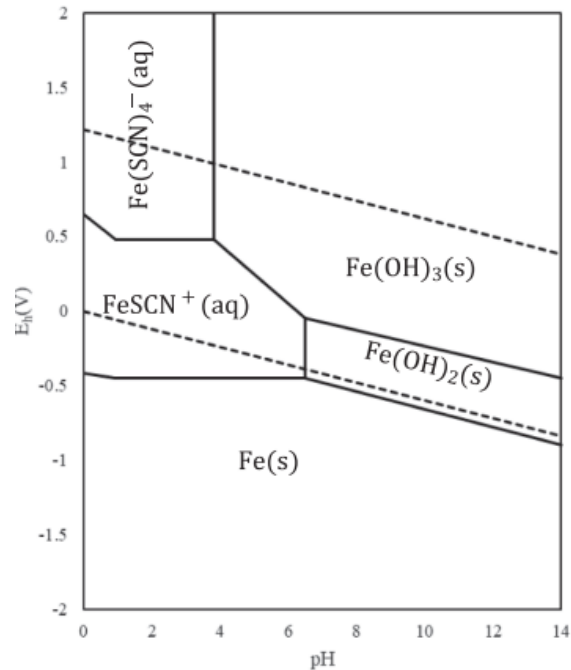
pelarutan emas menggunakan tiosianat membentuk aurous dan auric ini dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2. Kemudian berdasarkan diagram Eh-pH pada Gambar 2.2 menunjukkan bahwa emas membentuk senyawa *auric* pada potensial yang lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa *aurous*.



Gambar 2.2 Diagram Eh-pH Pada Sistem Au-SCN-H₂O (Azizitorghabeh et al, 2021)

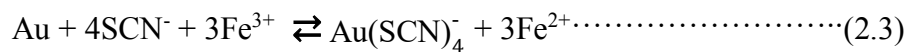
Sistem pelindian tiosianat adalah dalam kondisi asam sehingga bisa digunakan langsung untuk pelindian bijih sulfida pre-oksidasi. Karakteristik lainnya dari sistem pelindian dengan tiosianat adalah agen pengoksidasi seperti

Fe³⁺ stabil dalam kondisi asam sehingga dapat digunakan dalam proses (Kholmogorov et Al., 2002).



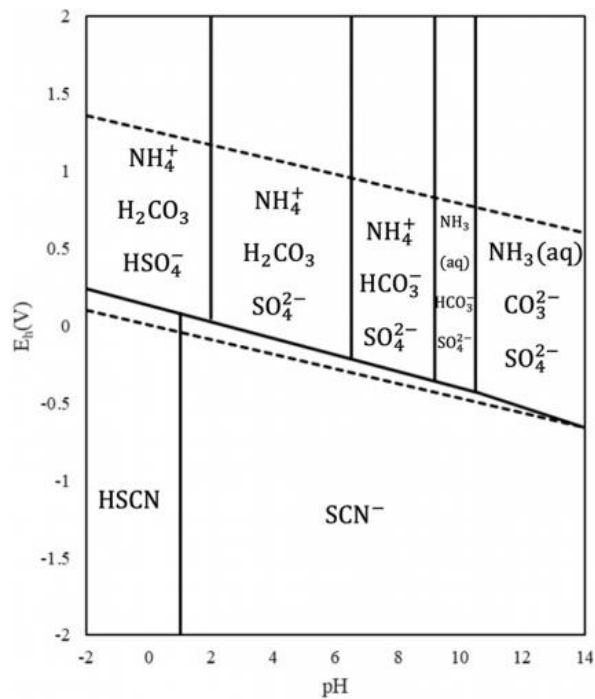
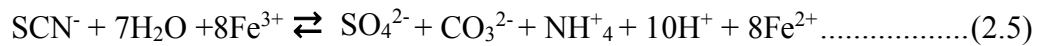
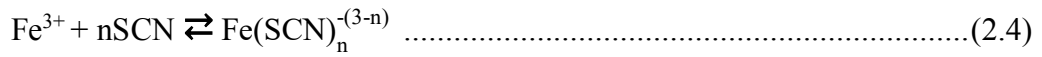
Gambar 2.3 Diagram Eh-pH Sistem Fe-SCN-H₂O (Li et al, 2012)

Pelindian dengan tiosianat dapat dilakukan pada konsentrasi 0,01-0,05 M dengan potensial 0,4-0,45 V dan pH 1-3 dengan penambahan feri sulfat sebesar 2-5 g/L sebagai oksidator. Reaksi antara reagen tiosianat dengan bijih emas dapat dilihat pada persamaan berikut:



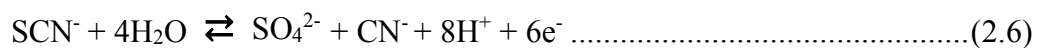
Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.3 yang menunjukkan diagram Eh-pH pada konsentrasi Fe 0,1 M dan Tiosianat 0,5 M. Pada potensial 0,6 V terbentuk kompleks yang stabil antara Fe³⁺ dengan tiosianat menjadi Fe(SCN)₄⁻. Reaksi antara ion feri dengan tiosianat ini memiliki beberapa pembentukan senyawa

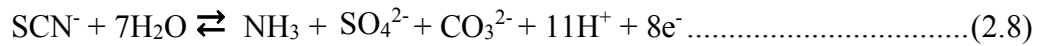
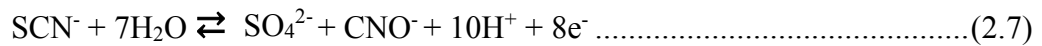
sesuai dengan persamaan 2.4. Namun secara termodinamika, tiosianat dapat dioksidasi oleh ion feri menjadi sulfat, karbonat, dan amonia seperti pada persamaan 2.5 (Li et Al, 2012).



Gambar 2.4 Diagram Eh-pH Sistem SCN-H₂O (Azizitorghabeh et al, 2021)

Gambar 2.4 menunjukkan diagram Eh-pH dengan konsentrasi tiosianat 0,1 M pada temperatur 25°C. Tiosianat dapat memiliki tiga reaksi oksidasi yang berbeda dan selalu teroksidasi menghasilkan sulfat. Seperti persamaan reaksi 2.6, 2.7, dan 2.8 berikut.





2.2.2 Tiourea

Tiourea [SC(NH₂)₂] memiliki tingkat toksisitas yang rendah dan laju kinetika reaksi 10 kali lebih cepat pada pelindian emas dengan penambahan agen pengoksidasi yang tepat dibandingkan dengan menggunakan larutan sianida (Li et Al, 2007). Namun tiourea dapat membentuk senyawa kompleks yang kuat dengan beberapa logam lainnya seperti tembaga, timah, dan seng, sehingga dapat meningkatkan konsumsi tiourea dalam pelindian (Van Deventer et Al, 1990).

Data toksisitas pada tiourea menunjukkan bahwa ia memiliki batas ambang yang tinggi untuk mamalia dan dosis mematikan 10 g/kg untuk manusia. Penggunaan tiourea sebagai reagen pelindian menghasilkan laju pelindian yang lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan sianida. Pada penelitian sebelumnya (Rezai, B, 2008) pada kondisi optimal dengan waktu pelindian 16 jam didapatkan persen ekstraksi emas 96% menggunakan tiourea dan sianida hanya sebesar 47% . Namun tiourea tidak stabil dalam larutan asam dan sering terdekomposisi karena keberadaan oksidator menjadi senyawa yang tidak bisa melarutkan emas.

Dari beberapa penelitian yang ada sebelumnya, disimpulkan bahwa feri sulfat merupakan oksidator yang paling efektif dalam proses pelindian menggunakan tiourea. Jika dibandingkan penggunaan feri sulfat dengan

hidrogen peroksida sebagai agen pengoksidasi, tiourea memang lebih cocok dengan feri sulfat sebaliknya dalam penggunaan reagen tiosianat dan tiourea memiliki hasil pelindian lebih tinggi jika menggunakan hidrogen peroksida sebagai oksidator (Adams et Al, 2020).

Tiourea dan ion feri dapat membentuk senyawa kompleks yang relatif stabil pada larutan asam. Namun konsumsi tiourea oleh ion feri yang terlalu tinggi akan membentuk *formamidine disulfide* yang menyebabkan permukaan emas menjadi pasif setelah beberapa waktu sehingga pada akhirnya menyebabkan kinetika pelindian emas dan perolehan emas yang rendah. Faktor yang menyebabkan hal ini sebagian besar karena adanya adsorpsi oleh partikel mineral, degradasi termal, pembentukan senyawa kompleks dengan logam utama, dan terjadinya dekomposisi oksidasi oleh ion feri dan oksigen. Konsentrasi ion feri adalah faktor utama yang menyebabkan konsumsi tiourea yang tinggi. Senyawa kompleks yang terbentuk saat reaksi pelindian menggunakan tiourea dapat dituliskan sebagai berikut (Yang et Al, 2011) :



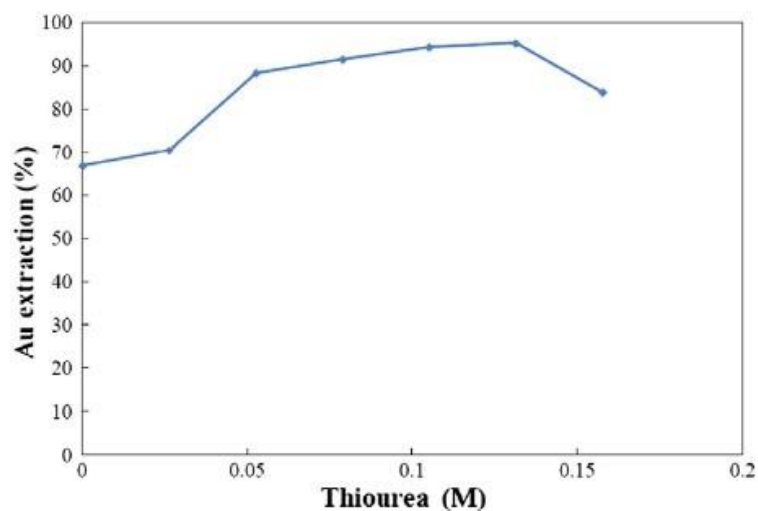
2.3 Pelindian Dual Reagen

Pemilihan metode pelindian sangat ditentukan oleh karakteristik bijih emas. Karakterisasi bijih emas yang baik akan menentukan pemilihan metode pengolahan yang tepat, yang akhirnya akan menentukan efektivitas proses pelindian bijih emas tersebut (Arham, La Ode. 2020). Penelitian untuk menemukan reagen alternatif yang paling baik untuk pelindian bijih emas telah banyak dilakukan, diantaranya

penggunaan reagen tiosianat dan tiourea. Kedua reagen ini memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Zhang et al tahun 2014, larutan campuran dengan toksisitas rendah dan sifat korosif yang rendah dari tiourea dan amonium tiosianat digunakan sebagai pelarut dalam pelindian bijih emas dengan konsentrasi tiourea 0,13 M dan tiosianat 0,78 M. Hasilnya didapatkan persen ekstraksi emas sebesar 95%.

2.3.1 Pengaruh Konsentrasi Tiourea

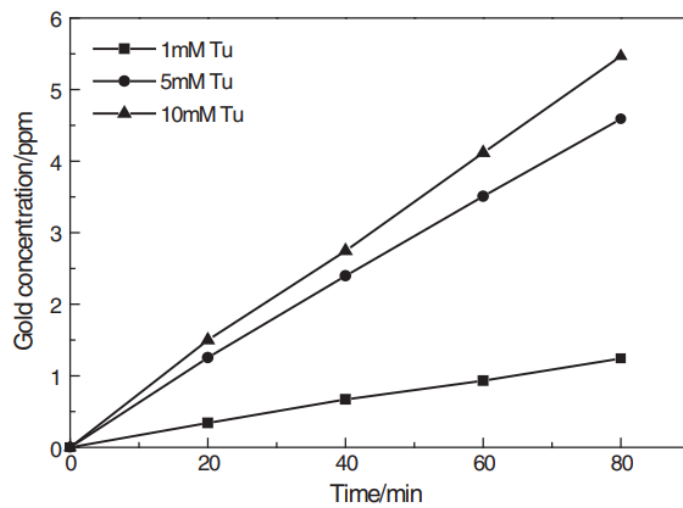
Penambahan tiourea ke dalam larutan tiosianat menjadi katalis dalam pelarutan emas memberikan keunggulan yang signifikan yaitu laju pelindian yang lebih cepat (Yang et Al,2010). Pengaruh konsentrasi tiourea pada pelindian emas dapat dilihat pada Gambar 2.2.



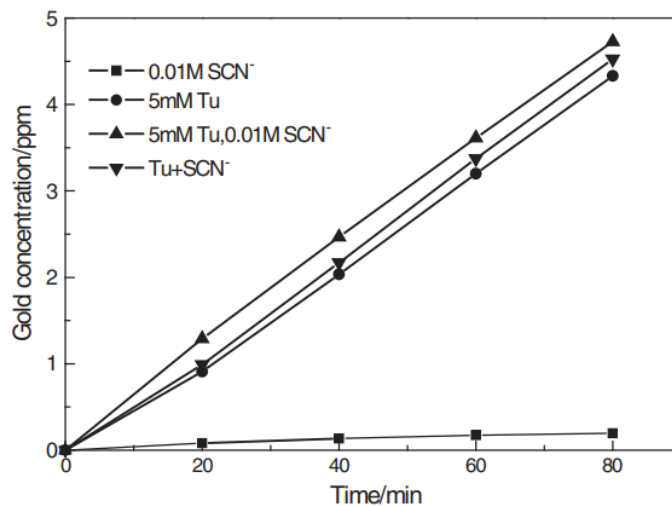
Gambar 2.5 Pengaruh Konsentrasi Tiourea terhadap Persen Ekstraksi Emas (Zhang et Al, 2014)

Dapat dilihat ekstraksi emas meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi tiourea hingga mencapai 95% saat konsentrasi tiourea 0,13 M (Zhang et Al, 2014). Hal ini sama dengan penelitian yang menggunakan hanya

larutan tiourea saja begitupun pada penelitian yang menggunakan disk emas dengan kemurnian 99,9 % yang memperlihatkan bahwa laju pelarutan emas sangat bergantung pada konsentrasi tiourea dan rasio molar tiourea terhadap tiosianat (Yang et Al, 2011).



Gambar 2.6 Pengaruh Konsentrasi Tiourea terhadap Kadar Emas yang Terlarut (Yang et Al, 2011)



Gambar 2.7 Perbandingan Pelindian dengan Penggunaan Reagen Tiourea, Tiosianat, dan Kombinasi Tiourea-Tiosianat terhadap Kadar Emas yang Terlarut (Yang et Al, 2011)

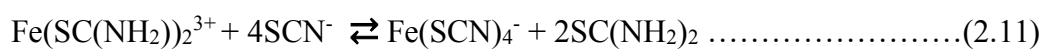
Pada gambar 2.6 dan 2.7 dapat dilihat bahwa rasio molar yang lebih tinggi dan konsentrasi tiourea sangat dianjurkan untuk meningkatkan laju kinetika reaksi. Juga dapat diperhatikan bahwa kombinasi tiosianat dan tiourea sebagai reagen dalam pelindian menunjukkan perolehan emas yang lebih tinggi dibandingkan hanya menggunakan salah satu reagen.

2.3.2 Pengaruh Konsentrasi Tiosianat

Laju pelarutan pada penggunaan larutan tiosianat sangat lambat, sehingga ini berarti tiosianat tidak terlalu berperan secara signifikan pada pelarutan emas secara langsung. Tiosianat harus dibantu dengan tiourea untuk meningkatkan laju pelarutan yang mana sekali lagi memperlihatkan bahwa tiourea dan tiosianat memiliki efek sinergis satu sama lain dalam melarutkan emas. Seperti yang dapat dituliskan dengan persamaan reaksi berikut ini:



Penambahan tiosianat dalam larutan campuran akan mengaktifkan permukaan partikel emas dengan menurunkan kemungkinan pasivasi permukaan yang disebabkan oleh $[\text{Au}(\text{Tu})_2]_2\text{SO}_4$ (Zhang et Al, 2001). Penambahan tiosianat pada larutan tiourea dapat menurunkan konsumsi tiourea bebas seperti yang dapat ditunjukkan dari persamaan reaksi 2.11. Semakin banyak tiourea bebas maka semakin banyak terjadinya ikatan reaksi antara tiourea dengan emas, sehingga dapat meningkatkan persen ekstraksi emas.



Selain itu tiosianat dapat membentuk ion feri kompleks dan menurunkan

oksidasi dari larutan pelindi. Pada penelitian yang dilakukan Yang et Al tahun 2011, pelindian dengan tiosianat dibandingkan dengan tiosianat-tiourea memiliki tingkat pelarutan emas yang rendah, sehingga dapat disimpulkan bahwa tiosianat tidak bekerja maksimal dalam pelarutan emas secara langsung dan membutuhkan tambahan tiourea untuk meningkatkan laju pelindian. Data laju pelindian dalam penelitian ini dapat dilihat Tabel 2.1.

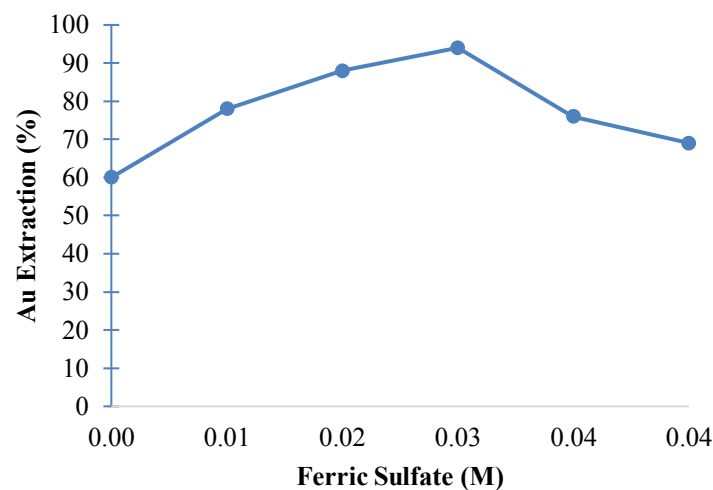
Tabel 2.1 Laju Pelindian Emas dengan Variasi Tiosianat dan Tiourea (Yang et al, 2010)

Konsentrasi Tiourea (M)	Konsentrasi Tiosianat (M)	Rasio Tiourea/Tiosianat	Laju Pelindian (mol/cm ² s)
0,005	0,005	1/1	4,30
0,005	0,02	1/4	2,79
0,005	0,05	1/10	2,22
0,005	0,01	1/2	3,44
0,01	0,01	1/1	4,21
0,005	0	∞	2,50
0	0,01	0	0,22

2.3.3 Pengaruh Oksidator

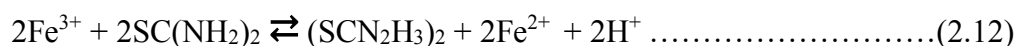
Feri sulfat adalah oksidator yang paling banyak digunakan dalam pelindian emas. Hal ini karena feri sulfat lebih stabil dibandingkan oksidator lainnya. Hidrogen peroksida (H₂O₂) dan asam peroksimonosulfat (H₂SO₅) adalah oksidator yang kuat, namun oksidator ini mengoksidasi tiosianat dengan cepat sehingga meningkatkan konsumsi reagen. Diantara oksidator ini Fe³⁺ juga memiliki biaya yang paling murah, sehingga Fe³⁺ biasa digunakan sebagai oksidator dalam pelindian menggunakan tiosianat di berbagai penelitian.

Dinyatakan bahwa ion feri merupakan oksidator yang paling baik untuk ekstraksi emas dengan sistem Au-tiosianat-H₂O (Li et Al, 2012). Feri sulfat juga diketahui merupakan oksidator yang paling cocok digunakan untuk larutan tiourea (Li et Al, 2006). Dalam pelindian dengan larutan campuran, peningkatan konsentrasi feri sulfat hanya memberikan sedikit peningkatan pada pelarutan emas.



Gambar 2.8 Pengaruh Konsentrasi Feri Sulfat terhadap Persen Ekstraksi Emas (Zhang et Al, 2014)

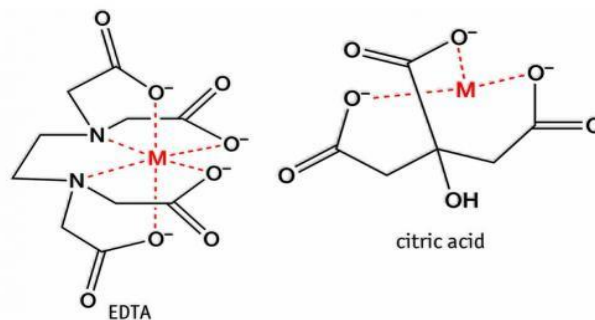
Dari Gambar 2.8 dapat diketahui bahwa ekstraksi emas meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi feri sulfat dan mencapai hasil maksimum yaitu 94% dengan konsentrasi feri sulfat 0,028 M. Setelahnya perolehan emas menurun seiring dengan peningkatan feri sulfat. Penurunan ini terjadi karena ion feri yang berlebih dapat mengubah tiourea menjadi *formamidine disulfide* (FDS) sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut.



Pada Persamaan 2.12 dapat dilihat bahwa reaksi antara tiourea dan feri sulfat dapat menurunkan konsentrasi tiourea bebas yang berguna untuk mengikat dan melarutkan Au. Hasilnya persentase ekstraksi emas pun menurun. Penambahan tiosianat dalam pelindian ini akan menurunkan konsumsi tiourea bebas yang terjadi karena feri sulfat, sehingga menghasilkan persentase ekstraksi emas yang lebih tinggi.

2.4 Agen pengkelat

Penggunaan oksidator yang berlebih pada proses pelindian dengan reagen tiourea merupakan salah satu faktor yang menyebabkan kenaikan konsumsi tiourea, sehingga dalam prosesnya diperlukan *stabilizer* untuk mengubah kembali *formamidine disulfide* menjadi tiourea atau membentuk kompleks dengan oksidator (Aylmore, 2016). Pada penelitian sebelumnya EDTA (*Ethylenediaminetetraacetic acid*) digunakan untuk membentuk kompleks dengan ion feri dan hasilnya dapat menurunkan konsumsi tiourea. Hal ini didasarkan pada temuan bahwa penurunan konsumsi tiourea oleh ion feri adalah dengan penggunaan reagen kimia yang memiliki kemampuan membentuk kompleks dengan ion feri dalam larutan asam (Kenna, 1991).



Gambar 2.9 Struktur Pengkelat EDTA dan Asam Sitrat (Selinger, 2019)

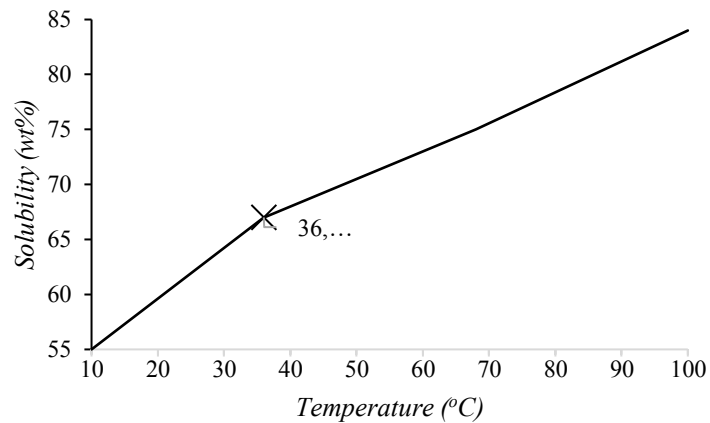
Agen pengkelat adalah senyawa organik atau anorganik yang mampu mengikat

ion logam untuk membentuk struktur seperti cincin kompleks yang disebut *chelates*. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.9, agen pengkelat ini bertindak seperti cakar yang mengaitkan ion logam tertentu dan mengikatnya, sehingga mencegah terjadinya presipitasi dan kerusakan. Kegunaan lainnya dari agen pengkelat adalah mengendalikan penguraian ion logam. Beberapa jenis agen pengkelat yang digunakan dalam industri dapat dilihat pada Tabel 2.2. Namun secara umum agen pengkelat yang sering digunakan adalah EDTA yang merupakan bahan sintetik. Sedangkan bahan pengkelat alami diantaranya asam sitrat dan asam asetat. Keduanya juga termasuk senyawa yang memiliki gugus karboksil.

Tabel 2.2 *Grouping of Chelating agents* (Smith, J, 1991)(Pravasi, 2014)

<i>Type</i>	<i>Example</i>
<i>Amino acids</i>	<i>Glycine</i>
<i>Aminocarboxylates</i>	<i>EDTA</i>
<i>Hydroxycarboxylates</i>	<i>Citric acid</i>
	<i>Acetic Acid</i>
	<i>Gluconic acid</i>
	<i>Tartaric acid</i>
<i>Polyphosphates</i>	<i>Hexametaphosphoric acid</i>
	<i>Pyrophosphoric acid</i>
	<i>Triphosphoric acid</i>
	<i>Phytic acid</i>

Asam sitrat ($C_6H_8O_7$) adalah salah satu asam organik. Sifatnya mudah larut dalam air, tidak berwarna dan padat pada suhu kamar. Asam sitrat dikenal tidak beracun dan termasuk dalam kelompok senyawa *Generally Recognized As Safe* (GRAS) (Shinta et Al, 2021).



Gambar 2.10 Kelarutan Asam Sitrat dalam Air terhadap Temperatur (Verhoff, 2015)

Dalam setiap molekul asam sitrat terdapat gugus karboksil dan satu gugus hidroksil yang terikat pada atom karbon, sehingga asam sitrat sangat efektif sebagai agen pengkelat. Asam sitrat telah digunakan untuk mengontrol ion feri dengan cara mengikat dan mencegah presipitasi ion tersebut menjadi *iron hydroxide* atau *iron sulfide* (Andotra, 2014). Selain digunakan sebagai zat pengompleks dalam pengolahan logam, asam sitrat juga digunakan sebagai monomer untuk polimer fungsional dan *biodegradable*, *water softener* dalam deterjen karena sifatnya sebagai agen pengkelat, dan *buffering* (Kirimura, 2019).

Asam organik lainnya yang digunakan sebagai agen pengkelat adalah asam asetat (CH_3COOH). Asam asetat atau asam cuka adalah senyawa organik yang mengandung gugus asam karboksilat, yang dikenal sebagai pemberi rasa asam dan aroma dalam makanan (Meriatna dan Lestari, 2019). Asam asetat merupakan asam karboksilat yang mempunyai berat molekul rendah (*low molecular weight carboxylic acids - LMWCA*). Molekul ini memiliki jumlah atom C antara 1 sampai dengan 5 per

molekul (Mubarok, 2014). Asam asetat banyak digunakan sebagai agen pengkelat terutama pada industri makanan dikarenakan asam asetat mempunyai satu elektron bebas pada gugus karboksilatnya, sehingga dapat mengikat ion logam. Asam asetat memiliki keunggulan lebih ramah lingkungan (gas emisi lebih rendah dan lebih mudah terdegradasi) dibandingkan dengan asam anorganik (Handoyo, 2019). Asam asetat dapat digunakan sebagai pengkelat karena asam asetat mempunyai 1 elektron bebas pada gugus karboksilatnya, sehingga asam asetat mampu mengikat logam. Asam asetat merupakan asam lemah, elektrolit lemah, derajat disosiasinya rendah yaitu 0,013 (Winarno, 2014).

2.5 Kinetika Pelindian

Kinetika pelindian dipelajari untuk mengetahui pengendali laju reaksi, menentukan model kinetika dan energi aktivasi suatu reaksi. Pengendali laju reaksi digunakan untuk mengetahui parameter apa yang dapat meningkatkan laju pelindian sehingga proses pelindian dapat dilakukan secara efektif.

2.5.1 Model Kinetika

Shrinking Core Model (SCM) adalah model kinetika yang paling sering digunakan dalam kinetika pelindian (Astuti, 2016). Dengan asumsi bahwa reaksi terjadi dari permukaan partikel hingga bagian inti partikel (Habashi, 1999). Pada model ini inti yang tidak bereaksi perlahan akan menyusut selama proses pelindian. Untuk lebih jelas lagi dapat dilihat seperti pada Gambar 2.11. Model kinetika ini terdiri dari 3 step pengendali laju sebagai berikut:

1. Difusi *Liquid Film*

$$X = kt \dots\dots\dots (2.13)$$

2. *Surface Chemical Reaction* (Reaksi Kimia)

$$1 - (1-X)^{\frac{1}{3}} = kt \dots\dots\dots (2.14)$$

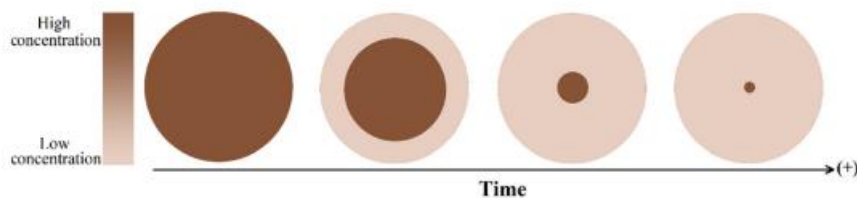
3. *Ash/Product Layer Diffusion Control*

$$\left(1 - \frac{2}{3}X\right) - (1-X)^{\frac{2}{3}} = kt \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan:

X = Fraksi Konversi

k = konstanta laju difusi (min^{-1})

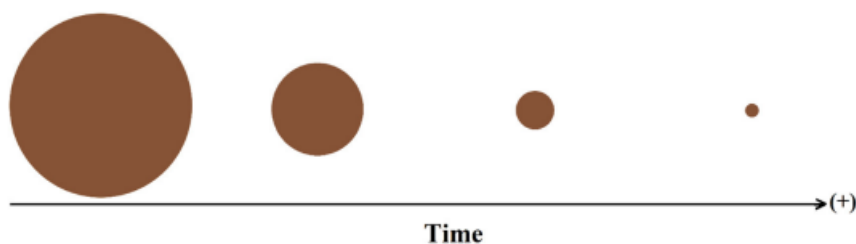


Gambar 2.11 Model Kinetika *Shrinking Core Model* (Faraji et al, 2020)

Selain *Shrinking Core Model*, ada kemungkinan partikel menyusut tanpa adanya padatan produk yang menutupi sebagai permukaan luar. Produk hasil reaksi kemungkinan berbentuk cair atau berbentuk padatan namun tidak menempel pada permukaan partikel. Model Kinetika ini disebut dengan *Shrinking Particle Model* (SPM) seperti yang terdapat pada Gambar 2.12.

Model kinetika ini terdiri dari 2 step pengendali laju yaitu reaksi kimia dan difusi *liquid film*. Adapun persamaan yang digunakan untuk kontrol reaksi kimia sama dengan SCM. Sedangkan untuk difusi *liquid film* persamaannya adalah sebagai berikut.

$$1 - (1-X)^{\frac{2}{3}} = kt \dots\dots\dots (2.16)$$



Gambar 2.12 Model Kinetika *Shrinking Particle Model* (Faraji et al, 2020)

2.5.2 Energi Aktivasi

Kinetika pelindian dapat dipengaruhi oleh temperatur. Temperatur dapat mempercepat laju difusi, memicu laju reaksi kimia, dan juga mempengaruhi kelarutan senyawa reaktan maupun produk. Secara umum, pengaruh temperatur pada laju pelindian dapat dilihat menggunakan persamaan Arrhenius (Missen et al. 1999):

$$k = k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan k adalah konstanta laju pelindian, E_a adalah energi aktivasi, T adalah temperatur, R adalah konstanta gas (8,314 J/mol.K), dan k_0 adalah faktor eksponensial. Secara umum energi aktivasi reaksi kimia lebih besar daripada difusi. Kenaikan temperatur dapat membuat reaksi kimia berjalan lebih cepat

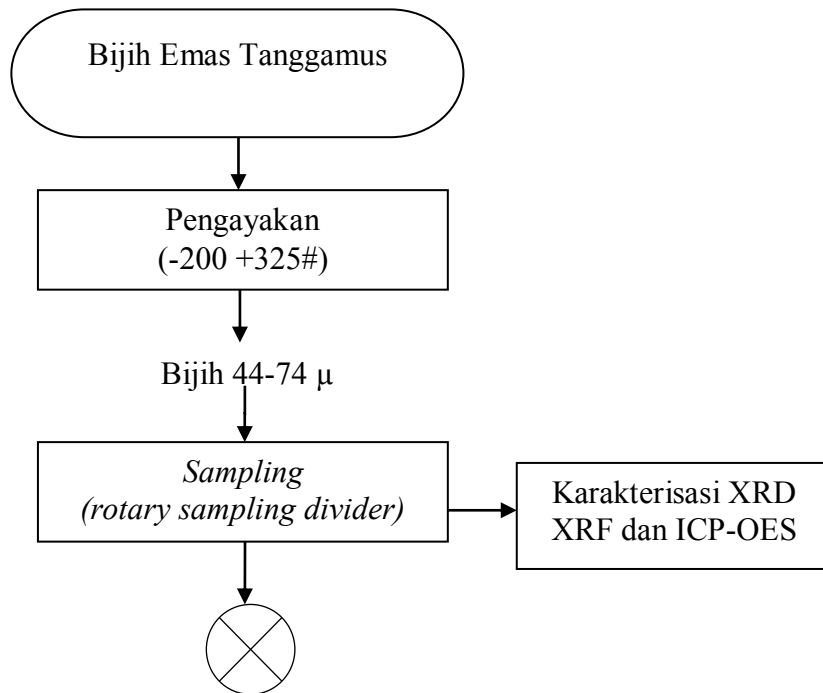
dibandingkan difusi karena energi aktivasi kimia lebih besar dibandingkan fenomena fisika (Levenspiel, 1999). Akibatnya dapat terjadi perubahan pengendali laju reaksi dari reaksi kimia ke difusi lapisan produk. Energi aktivasi untuk reaksi kimia biasanya lebih dari 40 kJ/mol. Sedangkan untuk difusi lapisan produk kurang dari 20 kJ/mol (Sun et al. 2009).

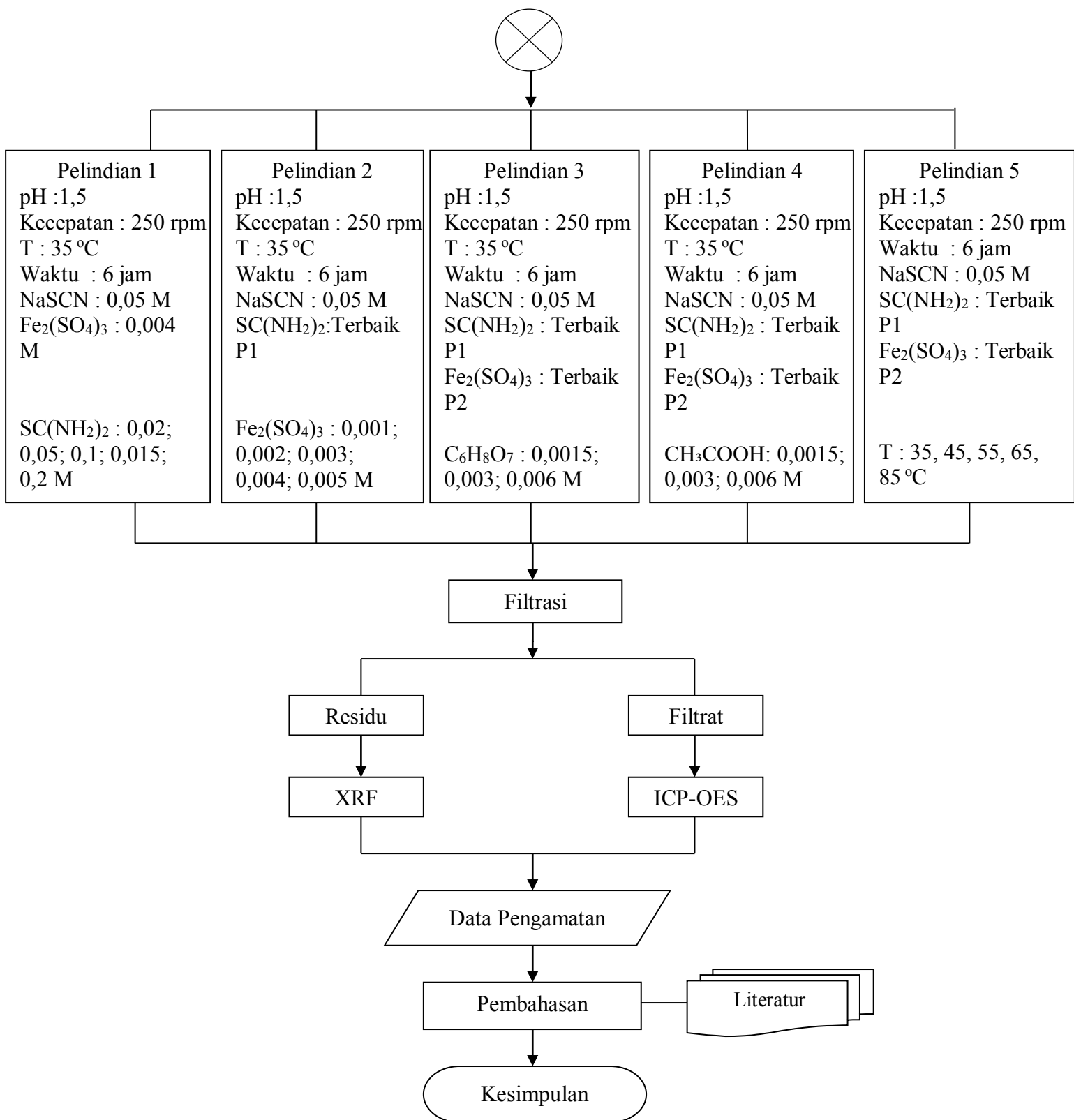
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Adapun prosedur percobaan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dijelaskan secara singkat melalui diagram alir seperti pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pelindian Bijih Emas Tanggamus dalam Larutan Tiosianat-Tiourea

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Percobaan

Alat-alat percobaan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Ayakan
2. Rotary sample divider
3. Termometer
4. *Hot plate*
5. Timbangan digital
6. *Magnetic stirrer*
7. Corong gelas
8. pH meter
9. Kertas saring
10. Gelas beker
11. Gelas ukur
12. Pipet mikro

3.2.2 Alat Pengujian

Alat pengujian yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Mesin Analisa ICP – OES merk PLASMA tipe Quant 9000 Elite
2. Mesin Analisa XRD merk Panalytical tipe X'Pert³ Powder
3. Mesin Analisa XRF merk Panalytical tipe Epsilon 3XLE

3.2.3 Bahan-bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Bijih Emas Lengkokai

2. Sodium Tiosianat (NaSCN)
3. Tiourea ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$)
4. Feri Sulfat (Fe_2SO_4)
5. Asam Sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)
6. Asam Asetat (CH_3COOH)
7. Asam Sulfat (HSO_4) 2,5 M
8. Akuades

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan proses yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel bijih emas yang digunakan adalah bijih emas refraktori yang berasal dari Tambang Lengkukai, Kabupaten Tanggamus sebanyak 2 kg. Sampel bijih yang didapatkan telah dipreparasi hingga ukuran bijih -200#. Kemudian dilakukan pengayakan dengan ayakan 325# dan dipilih bijih yang tertahan sehingga didapatkan ukuran bijih sekitar 45-74 mikron. Selanjutnya dilakukan proses *sampling* menggunakan *rotary sample divider* yang membagi sampel menjadi delapan bagian. Kemudian sampel diambil dua bagian dan disatukan. Kemudian sampel yang diperoleh dilakukan analisis mineral yang dominan dalam bijih dengan XRD kemudian analisis komposisi kimia dengan XRF dan ICP-OES.

3.3.2 Percobaan Pelindian

Pelindian dilakukan dengan menyiapkan larutan asam dengan volume larutan 100 ml. Pengaturan pH dibuat 1,5 dengan menambahkan asam sulfat 2,5 M. Variabel percobaan yang divariasikan yaitu konsentrasi tiourea dan oksidator, berikutnya dilakukan juga variasi penambahan asam sitrat dan asam asetat sebagai agen pengkelat. Pelindian dilakukan selama 6 jam dengan kecepatan pengadukan 250 rpm dan temperatur 35°C. Terakhir juga dilakukan pelindian dengan variasi temperatur dengan konsentrasi tiourea dan feri sulfat didapatkan dari konsentrasi terbaik pelindian sebelumnya. Kemudian larutan difiltrasi sehingga didapatkan filtrat yang akan dianalisis menggunakan ICP-OES dan residu dianalisis dengan XRF.

3.4 Metode Analisis

Karakterisasi ini merupakan serangkaian pengujian untuk mengetahui komposisi unsur dan juga senyawa yang ada di dalam sampel. Pada penelitian ini digunakan tiga macam metode karakterisasi yang berupa XRD, XRF, dan ICP-OES.

3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Berdasarkan standar ASTM C616, senyawa/fasa kristal yang terkandung dalam bijih dapat diketahui menggunakan pengujian XRD. Proses karakterisasi XRD ini dilakukan pada sampel awal setelah pengayakan. Prosedur pengujian ini dilakukan dengan cara sampel disiapkan sebanyak 2-3 gram yang kemudian diletakkan pada *sample holder*. Lalu sampel ditekan dan diratakan dengan kaca *slide*. Setelah itu sampel akan dianalisis dan hasil akan terlihat seperti beberapa puncak grafik pada layar komputer.

3.4.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

Berdasarkan standar ASTM E1621, kadar unsur dalam bijih dapat diketahui melalui pengujian XRF. Pada penelitian ini Analisa XRF dilakukan pada sampel awal setelah pengayakan dan sampel residu hasil pelindian. Cara ujinya adalah pertama *Mylar* dipasang pada *cup holder*. Lalu sampel sebanyak 2-3 gram dimasukkan ke dalam *cup holder*. Setelahnya *cup holder* dimasukkan ke dalam alat XRF, lalu analisis XRF dilakukan secara komputerisasi.

3.4.3 Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

Proses karakterisasi terakhir yang digunakan pada penelitian ini adalah ICP-OES. Standar yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM D1976. Sampel yang analisis dengan ICP-OES pada penelitian ini adalah filtrat hasil pelindian. Dari hasil karakterisasi ini akan diketahui kadar Au yang terlarut pada proses pelindian. Cara pengujian ini pertama yaitu sampel disiapkan dengan melakukan pengenceran menggunakan pelarut standar HCl 1 M untuk melarutkan Au dan HNO₃ 2% untuk melarutkan unsur lainnya dengan faktor pengenceran 10 kali. Kemudian larutan standar untuk kalibrasi disiapkan dan setelahnya kode sampel dimasukkan melalui *software* pada komputer. Terakhir, larutan sampel dihubungkan ke alat uji melalui *capillary tube* dan secara otomatis intensitas dan kadar unsur akan terlihat pada komputer.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Bijih Emas Tanggamus

Proses analisis bijih emas Kabupaten Tanggamus yang digunakan sebagai sampel dalam penelitian ini dilakukan menggunakan XRD, XRF, dan ICP-OES. Ketiga analisis ini dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral dan unsur yang ada pada bijih emas.

4.1.1. Hasil Analisis XRF dan ICP-OES

Pada analisis XRF, emas (Au) tidak terdeteksi karena rendahnya konsentrasi emas di bawah deteksi alat XRF yang digunakan. Oleh karena itu dilakukan analisis ICP-OES untuk mengetahui kadar emas pada bijih emas Tanggamus. Berdasarkan data hasil analisis ICP-OES yang ada pada Tabel 4.2 diketahui kadar emas yang terkandung di dalam bijih emas Tanggamus adalah sebesar 0,7743 ppm.

Tabel 4.1 Hasil Analisis ICP-OES Bijih Emas Tanggamus

Unsur	Kadar (ppm)
Au	0,7743
Cu	1,5012

Analisis XRF dilakukan untuk mengetahui konsentrasi dan kandungan unsur lainnya yang terdapat pada bijih emas Tanggamus. Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui unsur utama yang terkandung dalam bijih emas Tanggamus adalah besi, silikon, sulfur, dan alumunium. Adanya unsur sulfur sebesar 17% dapat disimpulkan bahwa bijih emas Tanggamus termasuk ke dalam tipe bijih sulfida.

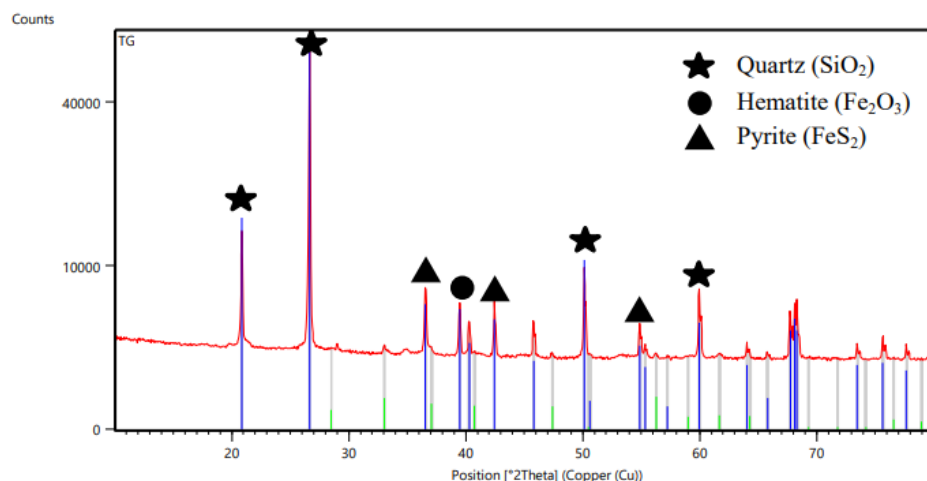
Tabel 4.2 Hasil Analisis XRF Bijih Emas Tanggamus

Unsur Major	Kadar (%)	Unsur Minor	Kadar (ppm)
Fe	35,889	Ba	395,2
Si	31,148	Cr	340,75
S	17,272	Te	205,7
Al	7,996	Rb	186,7
K	2,269	Sb	151,8
Mn	1,290	Zr	112,9
Mg	0,939	Se	94,2
Pb	0,742	Sr	76,6
Ca	0,549	V	43,55
As	0,513		
Ti	0,299		
Sn	0,284		
Zn	0,255		

4.1.2. Hasil Analisis XRD

Gambar 4.1 merupakan hasil analisis XRD pada sampel bijih emas Tanggamus. Dari pola difraksi dapat dilihat bahwa terdapat tiga mineral yaitu

kuarsa (SiO_2), hematit (Fe_2O_3), dan pirit (FeS_2). Sifat refraktori yang paling umum terjadi adalah karena adanya enkapsulasi emas murni atau terperangkapnya partikel emas di dalam butiran mineral induk. Mineral yang biasanya menjadi tempat enkapsulasi emas ini antara lain mineral sulfida, silikat, dan karbonat (Yannopoulos J.C, 1991). Adanya mineral sulfida di dalam bijih emas cenderung meningkatkan sifat refraktori bijih emas. Partikel emas yang terjebak ini menyebabkan emas sulit untuk terlarut dan mempengaruhi persen ekstraksi emas.

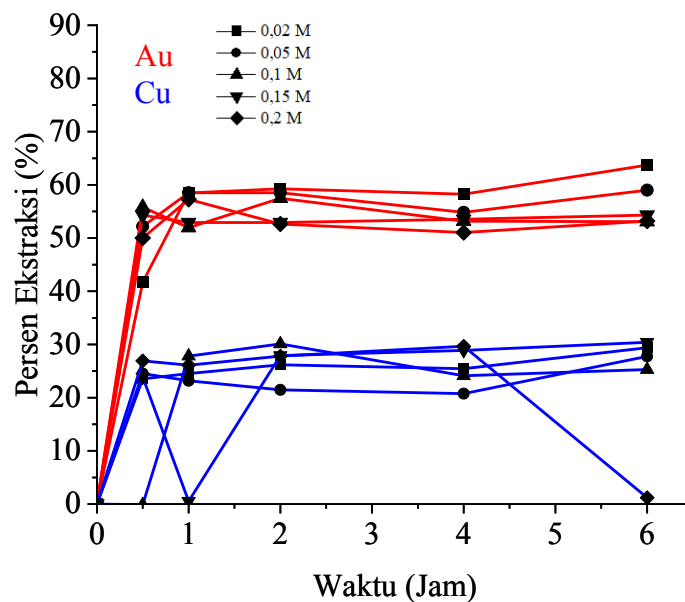


Gambar 4.1 Hasil Analisis XRD Bijih Emas Tanggamus (Mufakhir, F.R, 2018)

4.2 Pengaruh Konsentrasi Tiourea

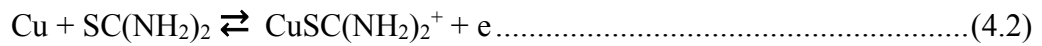
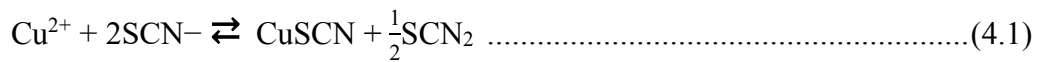
Proses sianidasi pada bijih emas kompleks yang mengandung sulfur, arsenik, zink, mangan, atau bijih karbonat sangat tidak dianjurkan karena dapat menurunkan ekstraksi emas dengan signifikan. Sianidasi sendiri lebih efektif jika dilakukan pada

bijih oksida. Oleh karena itu, digunakan reagen alternatif yang memiliki toksisitas rendah serta proses reaksi yang cepat. Reagen alternatif yang banyak diteliti diantaranya adalah tiosianat dan tiourea. Penambahan tiourea pada pelindian dengan menggunakan tiosianat menunjukkan efek sinergis yang menghasilkan persen ekstraksi emas lebih tinggi dibandingkan hanya menggunakan salah satu reagen saja. Pengaruh penambahan tiourea terhadap persen ekstraksi emas ini dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Konsentrasi Tiourea Terhadap Persen Ekstraksi

Grafik pada Gambar 4.2 memperlihatkan dua unsur yaitu Au dan Cu. Keberadaan bijih emas di alam biasanya terasosiasi dengan Cu dan logam pengotor lainnya. Selain itu Cu juga dapat terlarut dalam tiourea dan tiosianat sebagaimana terlihat pada Persamaan 4.1 dan 4.2 (Azizitorghabeh, 2021), sehingga keberadaan Cu juga ikut mengonsumsi tiourea dan tiosianat.



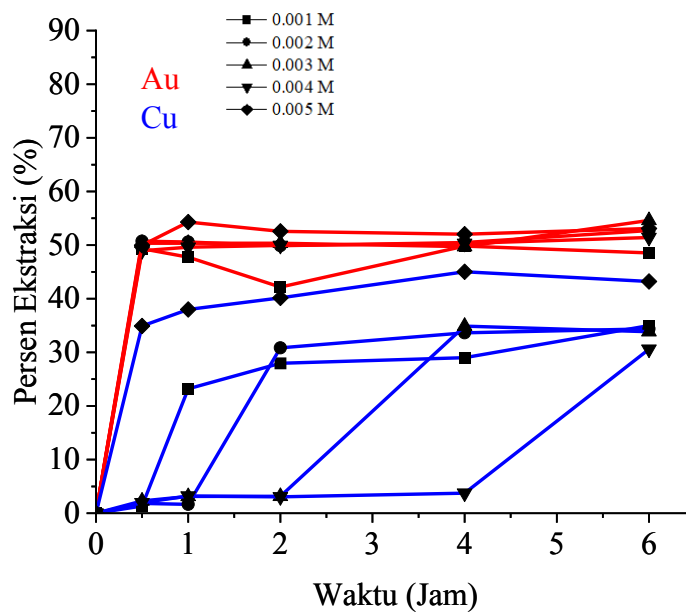
Berdasarkan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa persen ekstraksi Au tertinggi didapatkan pada konsentrasi tiourea terendah yaitu 0,02 M dengan persen ekstraksi sebesar 63,72 persen. Hal ini sesuai dengan literatur yang menunjukkan perbandingan tiourea dan tiosianat yang lebih rendah akan meningkatkan ekstraksi Au. Hal ini disebabkan tiourea yang tidak stabil dan dengan cepat mudah terurai menjadi zat yang tidak dapat melarutkan emas seperti sianamida (CN₂H₂) dan sulfur (Li et Al, 2006). Pada penelitian (Zhang et Al, 2014) dinyatakan bahwa ekstraksi emas terutama bergantung pada keberadaan tiourea bebas. Berdasarkan persamaan 2.12 dapat dilihat bahwa ikatan antara tiourea dan ion feri dapat menurunkan tiourea bebas dalam larutan pelindian sehingga menghasilkan penurunan ekstraksi Au. Sementara itu sesuai dengan persamaan 2.11 keberadaan tiosianat dapat mengurangi dekomposisi tiourea dan melepaskan tiourea yang berikatan dengan ion feri, sehingga semakin tinggi konsentrasi tiosianat di dalam larutan akan meningkatkan konsentrasi tiourea bebas yang nantinya akan berikatan dan melarutkan Au. Kemudian Gambar 4.2 juga menunjukkan bahwa persen ekstraksi Cu yang didapatkan lebih rendah dari persen ekstraksi Au dengan persentase tertinggi hanya sebesar 30,4 persen.

Grafik persen ekstraksi Au pada Gambar 4.2 juga didapatkan bahwa pelarutan emas meningkat tajam sejak awal proses pelindian hingga 30 menit berikutnya. Kemudian meningkat sedikit hingga 1 jam pertama dan setelah itu konstan. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi pembentukan senyawa kompleks antara Au dengan tiourea

dan tiosianat telah selesai pada 1 jam pertama. Dalam penelitian sebelumnya dinyatakan bahwa adanya mineral sulfida menjadi katalis yang mempercepat tiourea teroksidasi oleh ion feri, sehingga konsentrasi tiourea menurun drastis pada 40 menit pertama pelindian (Li et Al, 2006).

4.3 Pengaruh Konsentrasi Oksidator

Feri sulfat diketahui merupakan oksidator yang paling cocok digunakan untuk larutan tiourea maupun tiosianat. Menurut penelitian Zhang et Al tahun 2014, peningkatan konsentrasi feri sulfat hanya memberikan sedikit peningkatan pada pelarutan emas. Adapun pada penelitian ini didapatkan hasil dari pengaruh konsentrasi feri sulfat seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



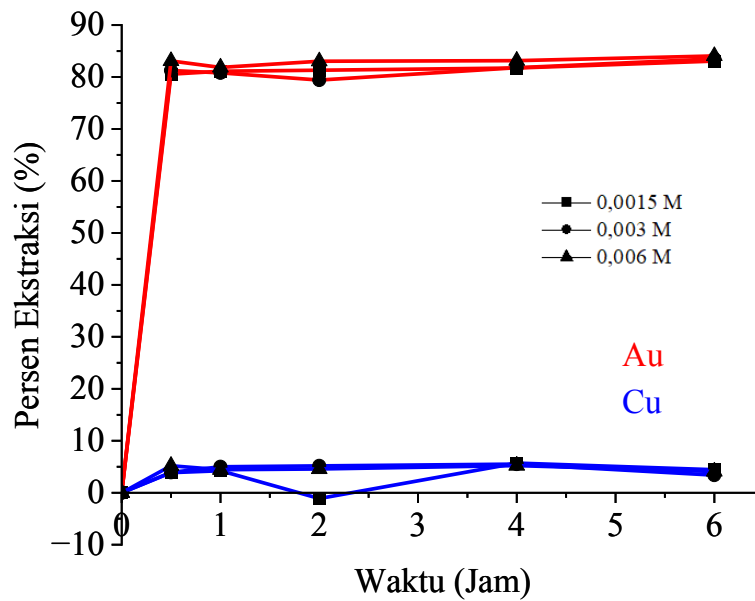
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Konsentrasi Feri Sulfat Terhadap Persen Ekstraksi

Berdasarkan Gambar 4.3, grafik persen ekstraksi Au mengalami peningkatan tajam pada 30 menit pertama dan setelahnya konstan. Lalu dari variasi feri sulfat yang dilakukan dapat dilihat bahwa peningkatan konsentrasi feri sulfat memberikan sedikit peningkatan pada persen ekstraksi Au. Persentase tertinggi didapatkan pada konsentrasi feri sulfat sebesar 0,003 M lalu menurun pada konsentrasi 0,004 M dan kembali meningkat pada konsentrasi 0,005 M. Berdasarkan Persamaan 2.12, hal ini kemungkinan terjadi karena semakin meningkatnya feri sulfat membuat sebagian tiourea teroksidasi oleh ion feri menjadi *formamidine disulfide* ($(\text{SCN}_2\text{H}_3)_2$) dan menurunkan konsentrasi tiourea dalam larutan pelindian, sehingga menyebabkan penurunan laju reaksi antara tiourea bebas dengan Au^+ yang berujung pada penurunan persen ekstraksi Au.

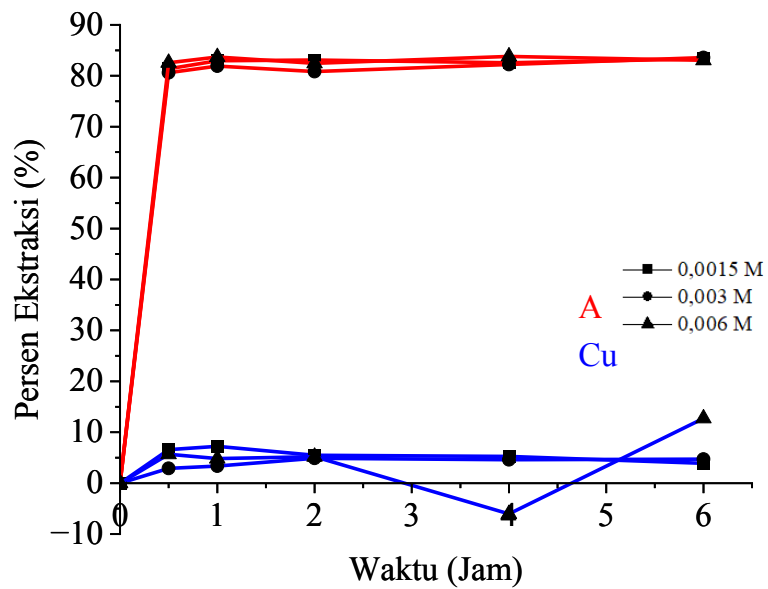
Sedangkan pada data persen ekstraksi Cu didapatkan bahwa peningkatan konsentrasi feri sulfat menunjukkan peningkatan persen ekstraksi Cu yang signifikan dengan persentase tertinggi pada konsentrasi 0,005 M yaitu sebesar 43,2%. Tren grafik juga terlihat meningkat seiring lamanya waktu pelindian dan juga meningkatnya konsentrasi feri sulfat dalam larutan.

4.4 Pengaruh Agen pengkelat

Salah satu penyebab utama tingginya konsumsi tiourea adalah karena adanya oksidator yang dapat mengoksidasi tiourea menjadi *formamidine disulfide* (FDS) seperti yang dapat dilihat pada persamaan 2.5. Penggunaan asam sitrat dan asam asetat sebagai agen pengkelat diharapkan dapat mengubah kembali FDS menjadi tiourea bebas atau membentuk kompleks dengan oksidator dan menjaga kestabilannya. Pengaruh penambahan asam sitrat dan asam asetat ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5.



Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat Terhadap Persen Ekstraksi



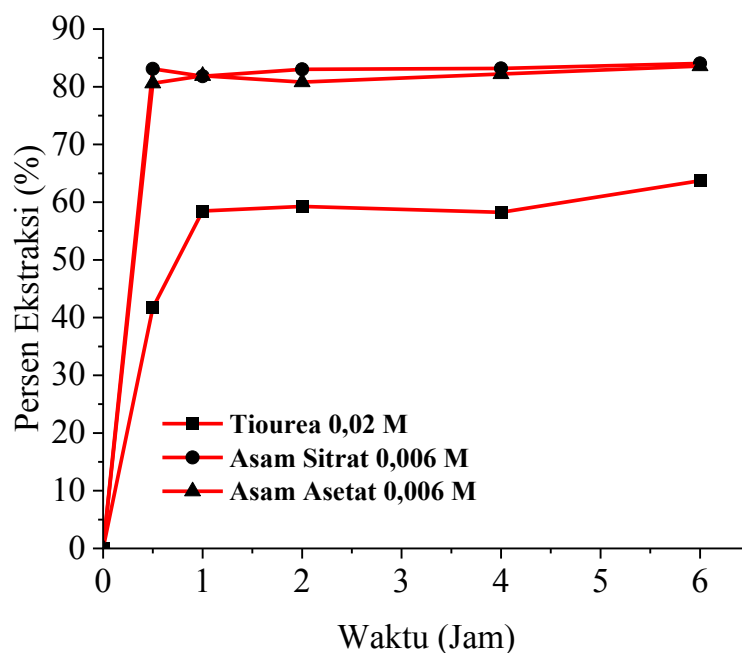
Gambar 4.5 Pengaruh Konsentrasi Asam Asetat Terhadap Persen Ekstraksi

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa persen ekstraksi Au tertinggi didapatkan dari konsentrasi asam sitrat 0,006 M yaitu sebesar 84,04 persen. Grafik menunjukkan

peningkatan tajam pada 30 menit pertama dan setelahnya konstan. Namun dari perbandingan grafik ketiga variasi asam sitrat tidak terlihat adanya peningkatan yang signifikan terhadap persen ekstraksi Au. Hasil ini sama dengan asam asetat pada Gambar 4.5 yang menunjukkan bahwa tidak ada peningkatan yang signifikan terhadap persen ekstraksi Au seiring dengan peningkatan asam asetat.

Sedangkan untuk persen ekstraksi Cu didapatkan hasil yang jauh lebih rendah dengan penambahan agen pengkelat dibandingkan tanpa penambahan agen pengkelat seperti terlihat pada Gambar 4.2 dan 4.3. Persen ekstraksi yang didapat setelah penambahan agen pengkelat asam sitrat dan asam asetat yaitu masing-masing sebesar 5,7 persen dan 12,7 persen, sehingga dapat dikatakan penambahan agen pengkelat dapat meningkatkan persen ekstraksi Au dan menekan laju pelarutan Cu. Hal ini dapat mempermudah proses pengolahan Au selanjutnya seperti adsorpsi dan pemurnian Au.

Dari kedua asam diatas yang dijadikan sebagai agen pengkelat tidak terlihat adanya perubahan yang signifikan yang terjadi seiring dengan peningkatan konsentrasi yang ditambahkan dalam larutan pelindian menggunakan reagen tiosianat dan tiourea. Namun jika dibandingkan dengan kondisi pelindian saat hanya menggunakan tiosianat dan tiourea, terlihat bahwa persen ekstraksi yang didapatkan mengalami peningkatan yang signifikan. Adapun perbandingan ini dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Semua Variasi dengan Perolehan Persen Ekstraksi Au Tertinggi

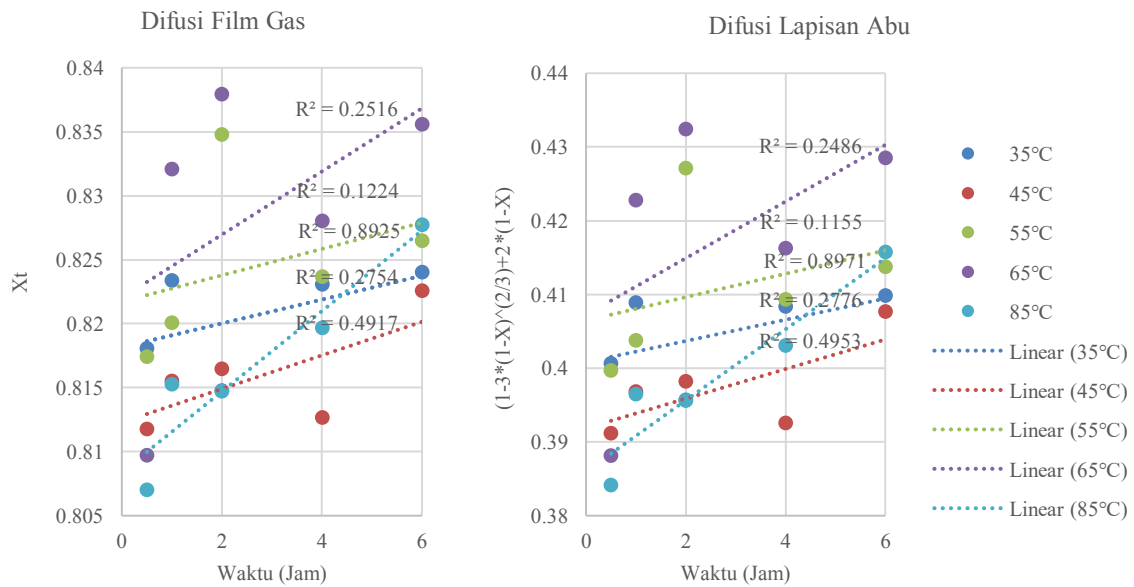
Berdasarkan Gambar 4.6 didapatkan bahwa perolehan persen ekstraksi Au tertinggi didapatkan dari pelindian dengan penambahan asam sitrat dan asam asetat 0,006 M yaitu sebesar 84,04 dan 83,79 persen. Hasil ini cukup jauh dari perolehan persen ekstraksi tanpa penambahan asam sitrat maupun asam asetat yaitu sebesar 63,72 persen. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa penambahan reagen kimia yang memiliki kemampuan untuk membentuk kompleks dengan ion feri dalam larutan asam dapat menurunkan konsumsi tiourea oleh oksidator feri sulfat (Kenna, 1991). Adanya asam sitrat dan asam asetat dalam larutan pelindian akan membentuk kompleks dengan feri sulfat sehingga konsentrasi tiourea bebas dalam larutan dapat meningkat dan menghasilkan peningkatan persen ekstraksi Au yang lebih tinggi.

4.5 Kinetika Pelindian

Kinetika pelindian dipelajari untuk memahami laju reaksi pada proses pelindian. Hal ini dilakukan untuk mempelajari beberapa pengaruh atau variabel yang dilakukan pada proses pelindian. Berikut merupakan model kinetika yang digunakan dalam penelitian ini dan energi aktivasi yang didapatkan.

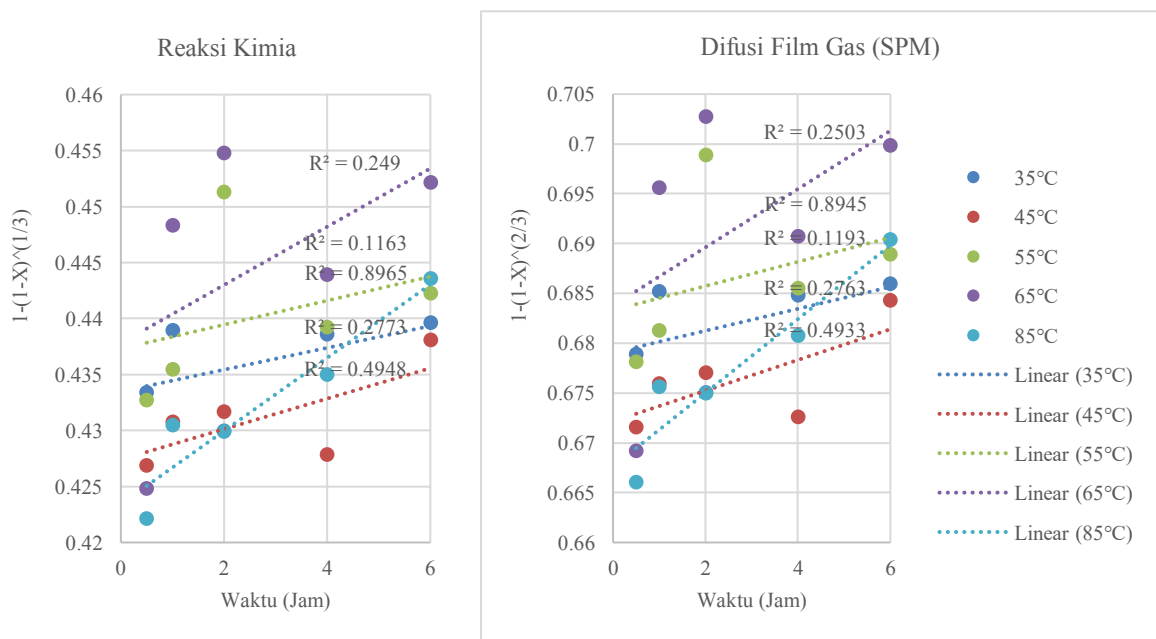
4.5.1 Model Kinetika

Model Kinetika yang paling banyak digunakan pada proses pelindian adalah *Shrinking Core Model*. Dengan asumsi bahwa partikel berbentuk bulat padat dan reaksi terjadi dari permukaan hingga inti partikel. Selain itu terdapat kemungkinan partikel menyusut tanpa adanya padatan produk yang menutupi sebagai permukaan luar. Model ini disebut dengan *Shrinking Particle Model*.



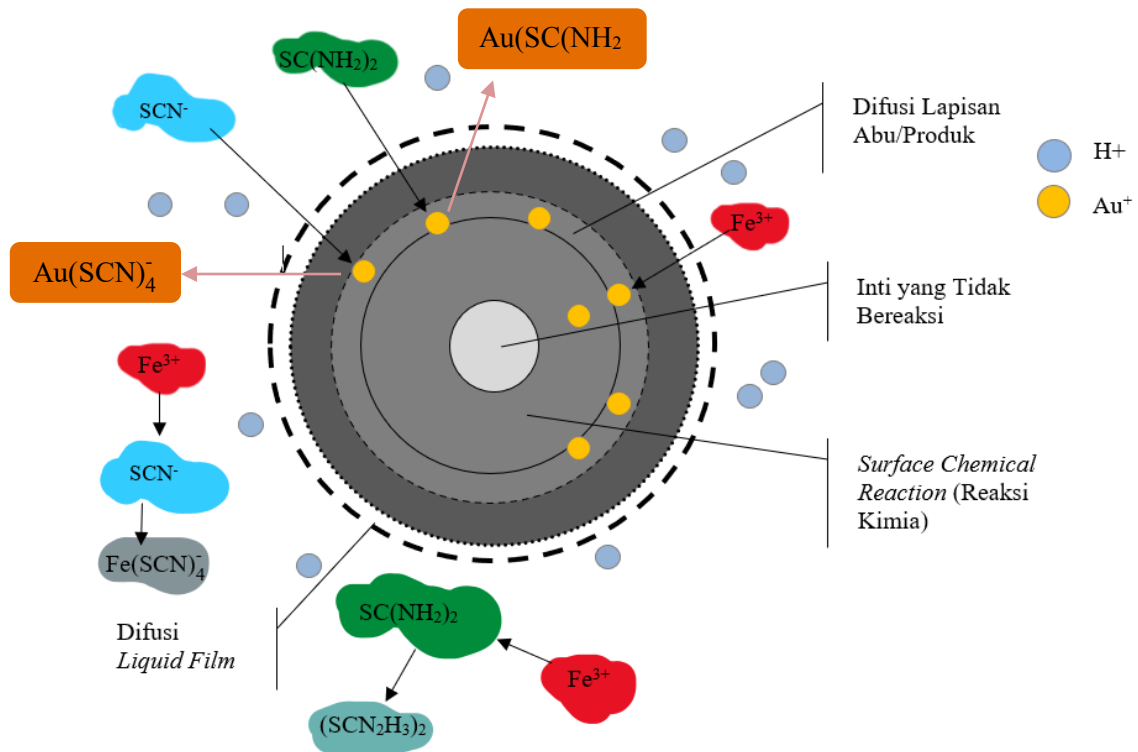
Gambar 4.7 Koefisien Relasi Difusi Film dan Difusi Lapisan Abu

Berdasarkan persamaan dari model SCM dan SPM ini dihitung koefisien relasi masing-masing pengendali laju dan didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.7, dan 4.8. Gambar 4.7 menunjukkan koefisien relasi dari pengendali laju difusi lapisan film dan difusi lapisan abu. Lalu koefisien relasi pengendali laju reaksi kimia dan difusi lapisan film (SPM) dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Koefisien Relasi Reaksi Kimia dan Difusi Film Gas (SPM)

Dari koefisien relasi masing-masing pengendali laju didapatkan hasil koefisien relasi tertinggi yaitu pada difusi lapisan abu, sehingga persamaan laju yang digunakan pada proses pelindian ini adalah difusi lapisan abu. Skematik SCM pada proses pelindian bijih emas menggunakan reagen tiosianat dan tiourea dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Skematik *Shrinking Core Model* Pada Pelindian Bijih Emas Menggunakan Tiosianat dan Tiourea

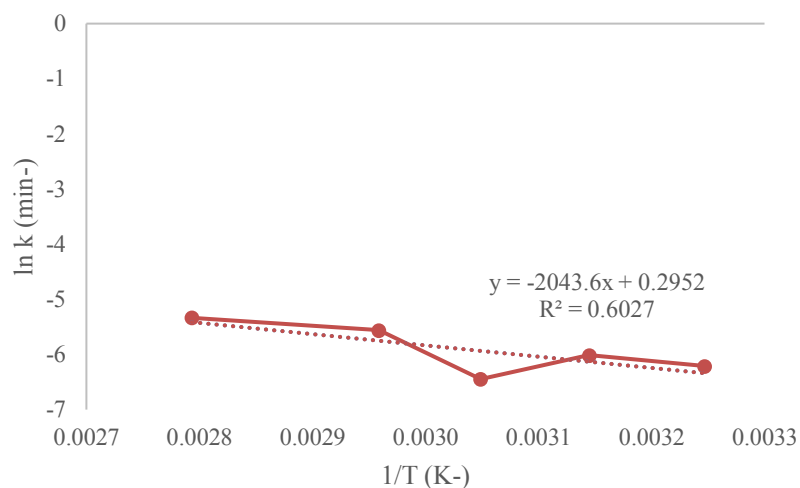
Tahapan-tahapan yang terjadi pada proses pelindian bijih emas ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Keberadaan ion feri sebagai oksidator dalam larutan mengoksidasi tiourea dan tiosianat menjadi FDS $(\text{SCN}_2\text{H}_3)_2$ dan $\text{Fe}(\text{SCN})_4^-$ sesuai Persamaan 2.12 dan 2.4. Lalu ion feri berdifusi ke dalam partikel bijih emas.
2. Difusi reagen pelindi tiourea $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)$ dan tiosianat (SCN^-) dalam padatan bijih emas melalui *liquid film*.
3. Penetrasi dan difusi reagen pelindi dan oksidator ke dalam lapisan abu/produk.

4. Reaksi reagen pelindi dan oksidator padatan bijih (Au) pada permukaan reaksi menjadi $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$ dan $\text{Au}(\text{SC}(\text{NH}_2)_2)_2^+$ sesuai persamaan 2.3 dan 2.9.
5. Difusi produk pelarutan (ion Au) melalui lapisan abu/produk menuju permukaan padatan luar.
6. Difusi produk pelarutan melewati *liquid film* kembali menuju ruah larutan pelindian.

4.5.2 Energi Aktivasi

Setelah didapatkan persamaan pengendali laju dari model kinetiknya. Dilakukan perhitungan energi aktivasi menggunakan persamaan arrhenius seperti pada persamaan 2.10. Gambar 4.11 merupakan grafik hubungan $\ln k$ terhadap $1/T$ pada proses pelindian bijih emas menggunakan reagen tiourea dan tiosianat.



Gambar 4.10 Grafik Hubungan $\ln k$ terhadap $1/T$

Temperatur dapat mempengaruhi laju pelindian secara signifikan atau tidak berdasarkan energi aktivasi. Perubahan pada temperatur dapat mengendalikan mekanisme pelindian dari reaksi kima menjadi difusi lapisan produk. Menaikkan temperatur dapat membuat reaksi kimia meningkat lebih cepat dibandingkan difusi karena energi aktivasi reaksi kimia lebih tinggi dibandingkan difusi. Akibatnya difusi lebih lambat dibandingkan reaksi kimia pada temperatur yang lebih tinggi, sehingga dapat menaikkan temperatur dapat mengakibatkan perubahan pengendali laju dari reaksi kimia menjadi difusi (film maupun lapisan produk). Energi aktivasi untuk reaksi kimia biasanya lebih dari 40 kJ/mol. Sedangkan untuk pengendali difusi kurang dari 20 kJ/mol. Jika energi aktivasi berada diantaranya maka kedua pengendali laju reaksi kimia dan difusi terlibat dalam prosesnya (Sun et al. 2009). Dari grafik pada gambar 4.11 dapat dihitung energi aktivasinya adalah sebesar 16,99 kJ/mol, sehingga dapat disimpulkan bahwa laju pelindian bijih emas menggunakan reagen tiourea dan tiosianat dikendalikan oleh pengendali laju yaitu difusi lapisan abu.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada pengaruh konsentrasi tiourea didapatkan persen ekstraksi tertinggi Au yaitu pada perbandingan tiourea dan tiosianat 2:5 yaitu sebesar 63,7%. Sedangkan pada Cu persen ekstraksi tertinggi didapatkan pada perbandingan 3:1 dengan 30,4%.
2. Pada pengaruh konsentrasi feri sulfat didapatkan persen ekstraksi tertinggi Au dan Cu pada konsentrasi feri sulfat 0,003 M dan 0,005 M yaitu sebesar 54,6% dan 45,03%.
3. Penambahan asam sitrat dan asam asetat pada larutan pelindian menghasilkan persen ekstraksi Au tertinggi yaitu sebesar 84% dan 83,5%. Sedangkan persen ekstraksi Cu hanya sebesar 5,7% dan 12,7 %.
4. Pengendali laju reaksi untuk pelindian bijih emas dengan tiourea dan tiosianat adalah difusi lapisan abu dengan energi aktivasi sebesar 16,99 kJ/mol.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya terkait pelindian bijih emas menggunakan tiourea dan tiosianat adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan oksidator lain seperti hidrogen peroksida (H_2O_2)
2. Menggunakan jenis agen pengkelat lainnya seperti EDTA dan asam malat.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, C.R. et. Al. 2020. An Alternative to Cyanide Leaching of Waste Activated Carbon Ash for Gold And Silver Recovery Via Synergistic Dual-Lixiviant Treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol 92. 120-130. ISSN 1226-086X. doi : 10.1016/j.jiec.2020.08.031
- Adams, M.D. et. Al. 2005. *Advances In Gold Ore Processing Volume 15 Developments in Mineral Processing*. Elsevier : Amsterdam
- Azizitorghabeh, A. et al. (2021) 'A review of thiocyanate gold leaching – chemistry, thermodynamics, kinetics and processing', *Minerals Engineering*, 160, p. 106689. doi:10.1016/j.mineng.2020.106689.
- Faraji, F., Alizadeh, A., Rashchi, F. and Mostoufi, N. (2020). Kinetics of leaching: a review. *Reviews in Chemical Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1515/revce-2019-0073>.
- Gavin Hilson, A.J. Monhemius, 2006. Alternatives to Cyanide in the Gold Mining Industry: What Prospects for The Future?. *Journal of Cleaner Production*. Vol 14, Issues 12–13. Pages 1158-1167. ISSN 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2004.09.005.
- Handayani, S., & Suratman, S. 2017. Teknologi Alternatif Pengolahan Bijih Emas Refraktori. *Biooksidasi*. 13 (3) 198-211. doi : 10.30556/jtmb.Vol13.No3.2017.191
- Habashi, Fathi. 1997. *Handbook of Extractive Metallurgy : Volume I : The Metal Industry Ferrous Metals*. Wiley-Vch, Weinheim

- Kenna, C., 1991. Extraction and Recovery of Gold. US Pat. 5,260,040
- Kholmogorov, A.G. et al. (2002) 'Thiocyanate Solutions in Gold Technology', *Hydrometallurgy*, 64(1), pp. 43–48. doi:10.1016/s0304-386x(02)00005-1.
- Kirimura, K. and Yoshioka, I. (2019) 'Citric acid', *Comprehensive Biotechnology*, pp. 158–165. doi:10.1016/b978-0-444-64046-8.00157-9.
- Li, J., Miller, J.D., 2006. A review of gold leaching in acid thiourea solutions. *Minerals Process. Extr. Metall. Rev.* 27, 177-214 doi: 10.1080/08827500500339315
- Li, J., Miller, J.D., 2007. Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solution using ferric sulfate as oxidant. *Hydrometallurgy* 89, 279-288 doi : 10.1016/j.hydromet.2007.07.015
- Meriatna, M. and Lestari, R. (2019) 'Pembuatan Asam ASETAT dari air Cucian Kopi robusta Dan Arabika dengan proses Fermentasi', *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 7(1), p. 61. doi:10.29103/jtku.v7i1.1169.
- Mufakhir, F.R. et Al. (2018). Characterization of Gold Ore From Tanggamus Mine Lampung Province. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 478(1). doi: 10.1088/1757-899X/478/1/012018
- Mufakhir, F.R. et al. (2019) 'Pelarutan Emas Pada Pelindian Konsentrat Emas Hasil roasting Menggunakan Reagen Tiosianat', *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(1), p. 24. doi:10.22146/jrekpros.41519.
- Pimenta, E., Calhoun, D.A. and Oparil, S. (2010) 'Hypertensive emergencies', *Cardiac Intensive Care*, pp. 355–367. doi:10.1016/b978-1-4160-3773-6.10028-x.
- S.D. Pravasi (2014). Acetic Acid. pp.33–35. doi:https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.00216-5.

- Smith, J. (1991) *Food Additive User's handbook*. London: Blackie Academic & Professional.
- Sun, X. et al. (2009) 'Technological conditions and kinetics of leaching copper from complex copper oxide ore', *Journal of Central South University of Technology*, 16(6), pp. 936–941. doi:10.1007/s11771-009-0156-6.
- The Royal Australian Chemical Institute Inc. (2019) Crabby Chemicals, *Chemistry in Australia* magazine. Available at: <https://chemaust.raci.org.au/article/septemberoctober-2019/crabby-chemicals.html> (Diakses: 3 Juni 2023).
- Van Deventer, J.S.J. et al. (1990) 'Galvanic interactions during the dissolution of gold in cyanide and thiourea solutions', *Minerals Engineering*, 3(6), pp. 589–597. doi:10.1016/0892-6875(90)90003-t.
- Yang, X., Moats, M.S., Miller, J.D., 2010a. The Interaction Of Thiourea And Formamidine Disulfide In The Dissolution Of Gold In Sulfuric Acid Solutions. *Minerals Engineering*. 23, 698-704 doi : 10.1016/j.mineng.2010.04.006
- Yang, X., Moats, M.S., Miller, J.D., 2010b. Gold Dissolution In Acidic Thiourea And Thiocyanate Solutions. *Electrochimica Acta* 55 (11), 3643-3649. doi: 10.1016/j.electacta.2010.01.105
- Zhang, J. et Al. (2014). Hydrometallurgy Dual Lixiviant Leaching Process For Extraction and Recovery of Gold From Ores at Room Temperature. *Hydrometallurgy*. Elsevier B.V., 144–145, doi: 10.1016/j.hydromet.2014.02.001.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

A.1 Perhitungan Kebutuhan Tiosianat dan Tiourea

$$\text{Massa Relatif (Mr) NaSCN} = 81,072 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mr SC(NH}_2)_2 = 76,12 \text{ g/mol}$$

$$\text{Volume Larutan} = 0,1 \text{ L}$$

$$\text{Molaritas (M) NaSCN} = 0,05 \text{ mol/L}$$

$$\text{M SC(NH}_2)_2 = 0,02 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa (m) NaSCN} &= \text{M NaSCN} \times \text{Mr NaSCN} \times \text{Volume Larutan} \\ &= 0,05 \text{ mol/L} \times 81,072 \text{ g/mol} \times 0,1 \text{ L} \\ &= 0,4 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{m SC(NH}_2)_2 &= 0,02 \text{ mol/L} \times 76,12 \text{ g/mol} \times 0,1 \text{ L} \\ &= 0,15 \text{ g} \end{aligned}$$

A.2 Perhitungan Berat Terlarut

$$\text{Volume Larutan} = 0,1 \text{ L}$$

$$\text{Faktor Pengenceran (FP)} = 10x$$

$$\text{Konsentrasi Awal} = 0,633 \text{ mg/L}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Terlarut} &= \text{Volume} \times \text{FP} \times \text{Konsentrasi Awal} \\ &= 0,633 \text{ mg/L} \times 10 \times 0,1 \text{ L} \\ &= 0,633 \text{ mg} \end{aligned}$$

A.3 Perhitungan Persen Ekstraksi

$$\begin{aligned}\% \text{ Ekstraksi Au} &= \frac{\text{Au filtrat} \times \text{FP} \times \text{volume larutan}}{10 \times \text{berat Au pada bijih}} \times 100\% \\ &= \frac{0,633 \text{ mg/L} \times 10 \times 0,1 \text{ L}}{10 \times 0,07 \text{ mg}} \times 100\% \\ &= 81,8\%\end{aligned}$$

LAMPIRAN B

DATA HASIL PENELITIAN

B.1 Variasi Tiourea

Tabel B.1 Data Porsen Ekstraksi Variasi Tiourea

Konsentrasi Tiourea (M)	Porsen Ekstraksi Au					
	Waktu (Jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,02	0	41,690011	58,46351	59,26943	58,24045	63,72413
0,05	0	52,18188	58,51646	58,51646	54,83395	59,00684
0,1	0	55,800191	51,95011	57,48204	53,17786	53,08464
0,15	0	54,284099	52,93086	52,93086	53,52932	54,32109
0,2	0	50,010386	57,27711	52,64831	51,043	53,21195

Tabel B.2 Data Porsen Ekstraksi Variasi Tiourea

Konsentrasi Tiourea (M)	Porsen Ekstraksi Cu					
	Waktu (Jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,02	0	23,5254	24,51904	26,17358	25,43156	29,39162
0,05	0	24,5175	23,16499	21,45627	20,74455	27,76878
0,1	0	-0,13531	27,79712	30,11033	24,1053	25,28801
0,15	0	23,87923	0,540529	27,89961	28,87092	30,40831
0,2	0	26,92594	26,09957	27,81318	29,67843	1,206172

B.2 Variasi Oksidator Feri Sulfat

Tabel B.3 Data Persen Ekstraksi Variasi Oksidator

Konsentrasi Feri Sulfat (M)	Persen Ekstraksi Au					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,001	0	49,327946	47,76311	42,17892	49,82236	48,54322
0,002	0	50,739705	50,58778	49,87858	50,47707	52,70815
0,003	0	50,351377	50,35138	50,35138	49,72348	54,61231
0,004	0	48,956051	49,62171	49,94892	50,32284	51,4143
0,005	0	49,972852	54,28366	52,55565	52,03615	53,08783

Tabel B.4 Data Persen Ekstraksi Variasi Oksidator

Konsentrasi Feri Sulfat (M)	Persen Ekstraksi Cu					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,001	0	1,36005	23,20269	27,95142	29,01209	34,98347
0,002	0	1,832578	1,654961	30,83769	33,65246	34,3801
0,003	0	2,294074	3,134401	3,146689	34,88112	33,84362
0,004	0	1,968304	3,198633	3,046291	3,745306	30,59165
0,005	0	34,9163	37,99359	40,15962	45,03709	43,22323

B.3 Variasi Asam Sitrat

Tabel B.5 Data Persen Ekstraksi Variasi Asam Sitrat

Konsentrasi Asam Sitrat (M)	Persen Ekstraksi Au					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,0015	0	80,55567	81,11967	81,32301	81,73103	83,0572
0,003	0	81,257922	80,80995	79,40904	81,7905	83,50113
0,006	0	83,105902	81,83673	83,03363	83,16425	84,0456

Tabel B.6 Data Persen Ekstraksi Variasi Asam Sitrat

Konsentrasi Asam Sitrat (M)	Persen Ekstraksi Cu					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,0015	0	3,87448	4,220829	-1,10942	5,70961	4,441269
0,003	0	3,907848	4,991287	5,174566	5,514065	3,393909
0,006	0	5,189538	4,435857	4,565018	5,213711	4,091127

B.4 Variasi Asam Asetat**Tabel B.7** Data Persen Ekstraksi Variasi Asam Asetat

Konsentrasi Asam Asetat (M)	Persen Ekstraksi Au					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,0015	0	81,37799	82,96675	83,08885	82,55155	83,31709
0,003	0	80,603252	81,91102	80,81826	82,21535	83,58955
0,006	0	82,552451	83,68023	82,44517	83,7911	83,02757

Tabel B.8 Data Persen Ekstraksi Variasi Asam Asetat

Konsentrasi Asam Asetat (M)	Persen Ekstraksi Cu					
	Waktu (jam)					
	0	0,5	1	2	4	6
0,0015	0	6,57333	7,244031	5,472214	5,255201	3,900812
0,003	0	2,900535	3,359815	4,875294	4,607772	4,716188
0,006	0	5,665775	4,8412	5,188095	-6,03342	12,71715

B.5 Model Kinetika dan Energi Aktivasi

Tabel B.9 Koefisien Korelasi Pengendali Laju Reaksi

Temperatur	Koefisien Korelasi			
	Difusi Film Gas	Difusi Lapisan Abu	Reaksi Kimia	Difusi Film Gas (SPM)
35	0,524753	0,526889	0,526611	0,52568313
45	0,701232	0,703767	0,703427	0,70233281
55	0,349867	0,339871	0,34103	0,34545255
65	0,501589	0,498598	0,498957	0,50029088
85	0,944717	0,947161	0,946839	0,94580283

Tabel B.10 Hubungan ln K terhadap 1/T

Temperatur (K)	Difusi Lapisan Abu		1/T (K ⁻¹)	ln k (min ⁻¹)	(-)ln k (min ⁻¹)	R2
	R2	k				
308	0,526889	0,002006	0,003247	-6,21158	6,21158	
318	0,703767	0,002446	0,003145	-6,01333	6,013334	
328	0,339871	0,001585	0,003049	-6,44711	6,447106	0,776345
338	0,498598	0,00384	0,002959	-5,56241	5,562407	
358	0,947161	0,004815	0,002793	-5,33611	5,336109	

Tabel B.11 Perhitungan Energi Aktivasi

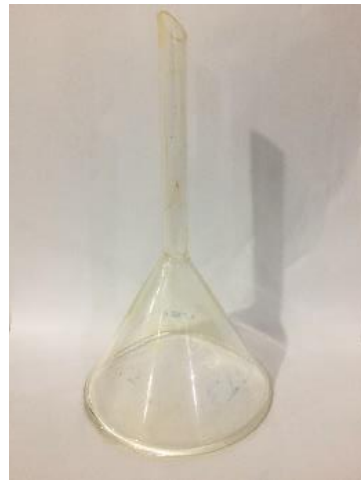
m	R (J/K.mol)	Ea (J/k.mol)	Ea (kJ/mol)
-2043,593	8,3145	16991,46	16,99146

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

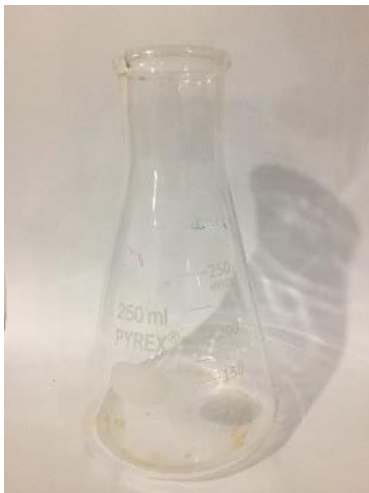
C.1 Gambar Alat



Gambar C.1 Ayakan



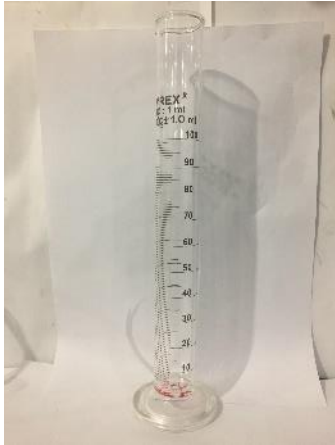
Gambar C.2 Corong



Gambar C.3 Erlenmeyer



Gambar C.4 Gelas Beker



Gambar C.5 Gelas Ukur



Gambar C.6 *Magnetic Stirrer*



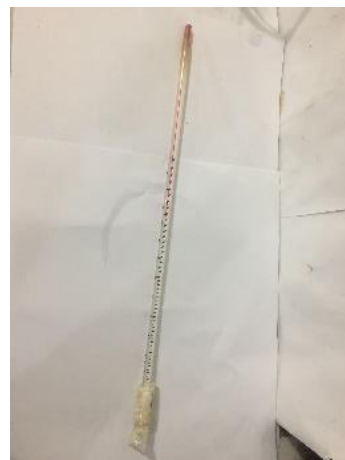
Gambar C.7 *Hot plate*



Gambar C.8 Labu Ukur



Gambar C.9 Kertas Saring



Gambar C.10 Termometer



Gambar C.11 *Oven*



Gambar C.12 pH Meter



Gambar C.13 XRF



Gambar C.14 XRD

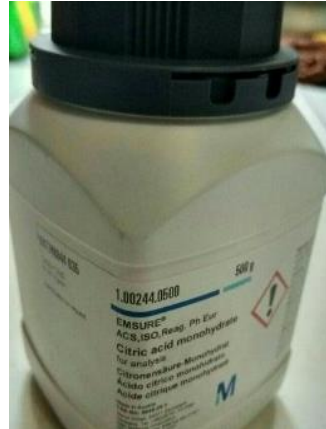


Gambar C.15 ICP-OES

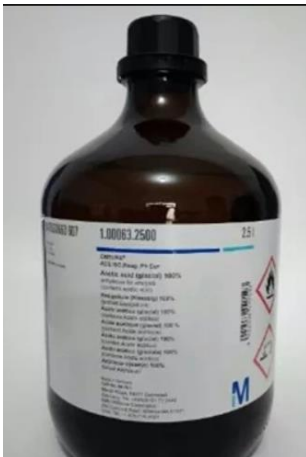
C.2 Gambar Bahan



Gambar C.17 Ferri Sulfat



Gambar C.18 Asam Sitrat



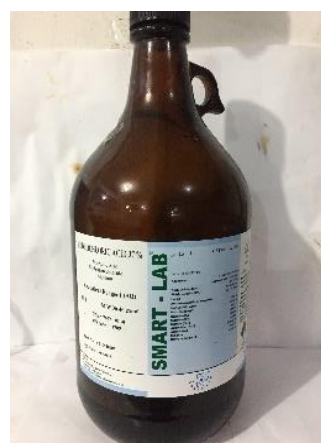
Gambar C.19 Asam Asetat



Gambar C.20 Sodium Tiosianat



Gambar C.21 Thiourea



Gambar C.21 Asam Sulfat 98%