

**PENGARUH KONSENTRASI ASAM SITRAT, SUHU, WAKTU, DAN
PULP DENSITY PADA PELINDIAN *COBALT* DARI KATALIS BEKAS
DENGAN METODE HIDROMETALURGI**

(Skripsi)

Oleh

JIHAN NABILAH YULFIRA



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI ASAM SITRAT, SUHU, WAKTU, DAN *PULP DENSITY* PADA PELINDIAN *COBALT* DARI KATALIS BEKAS DENGAN METODE HIDROMETALURGI

Oleh

JIHAN NABILAH YULFIRA

Penelitian mengenai *recovery* logam *cobalt* (Co) dari katalis bekas hidrodesulfurisasi menggunakan metode ekstraksi padat-cair telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh bahan baku logam Co yang dapat digunakan kembali menggunakan ultrasonik pada variasi *pulp density*, suhu, konsentrasi asam sitrat, dan waktu pelindian terhadap kinetika reaksi pelindian *cobalt* sehingga dapat mengurangi masalah lingkungan yang timbul akibat limbah katalis bekas hidrodesulfurisasi.

Metode ini dilakukan dengan pelindian *duplo* logam Co dari katalis bekas menggunakan Na_2CO_3 1 M pada suhu 60°C dan *pulp density* 2,5% selama 2 jam yang dilanjutkan dengan pelindihan menggunakan asam sitrat dengan variasi *pulp density*, suhu, konsentrasi asam sitrat, dan waktu pelindian. Filtrat setelah pelindian dikarakterisasi dengan AAS dan residu pelindian dikarakterisasi dengan XRF.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *recovery* logam Co dalam filtrat secara optimum sebesar 37,275% dan kandungan logam Co dalam residu dalam rentang sebesar 14,09–14,4% yang dilakukan dengan agen pelindi asam sitrat 1 M dengan *pulp density* 2,5% pada suhu 60°C selama 120 menit. Penelitian ini menggunakan model kinetika *Shrinking Core* (SCM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya indikasi difusi dalam mengendalikan laju pelindian dengan nilai R^2 dari analisis SCM sebesar 0,998 dan energi aktivasi yang negatif dari analisis Arrhenius sebesar $6,202 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($30^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$) dan $-25,04 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($60^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$) yang menunjukkan bahwa pelindian tidak dikontrol oleh satu mekanisme (*mixed control system*) karena konstanta laju tidak meningkat secara konsisten.

Kata kunci: *cobalt*, *recovery*, pelindian, Na_2CO_3 , asam sitrat, kinetika

ABSTRACT

THE EFFECT OF CITRIC ACID CONCENTRATION, TEMPERATURE, TIME, AND PULP DENSITY ON COBALT LEACHING FROM SPENT CATALYSTS USING THE HYDROMETALLURGICAL METHOD

By

JIHAN NABILAH YULFIRA

Research on the recovery of cobalt (Co) metal from spent hydrodesulfurization catalyst using solid-liquid extraction method has been conducted. This study aims to obtain reusable Co metal raw materials using ultrasonics at variations in pulp density, temperature, citric acid concentration, and leaching time on the kinetics of cobalt leaching reaction so as to reduce environmental problems arising from spent hydrodesulfurization catalyst waste.

This method is carried out by duplo leaching of Co metal from spent catalyst using Na_2CO_3 1 M at a temperature of 60°C and a pulp density of 2.5% for 2 hours followed by leaching using citric acid with variations in pulp density, temperature, citric acid concentration, and leaching time. The filtrate after leaching was characterized by AAS and the leaching residue was characterized by XRF.

The results of the study showed that the optimum recovery of Co metal in the filtrate was 37.275% and the Co metal content in the residue was in the range of 14.09–14.4% which was carried out with a 1 M citric acid leaching agent with a pulp density of 2.5% at a temperature of 60°C for 120 minutes. This study used the Shrinking Core kinetics model (SCM). The research results show that there are indications of diffusion in controlling the leaching rate with an R^2 value from SCM analysis of 0.998 and a negative activation energy from Arrhenius analysis of sebesar $6.202 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($30^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$) and $-25.04 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($60^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$) which indicates that leaching is not controlled by one mechanism (mixed control system) because the rate constant does not increase consistently.

Keywords: cobalt, recovery, leaching, Na_2CO_3 , citric acid, kinetic

**PENGARUH KONSENTRASI ASAM SITRAT, SUHU, WAKTU, DAN
PULP DENSITY PADA PELINDIAN *COBALT* DARI KATALIS BEKAS
DENGAN METODE HIDROMETALURGI**

Oleh

JIHAN NABILAH YULFIRA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

**: PENGARUH KONSENTRASI ASAM
SITRAT, SUHU, WAKTU, DAN PULP
DENSITY PADA PELINDIAN COBALT
DARI KATALIS BEKAS DENGAN
METODE HIDROMETALURGI**

Nama Mahasiswa

: Jihan Nabilah Yulfira

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1917011098

Program Studi

: Kimia

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Dr. Drs. Hardoko Insan Qudus, SU.
NIP 19610203 198703 1 002

Prof. Dr. Eng. Widi Astuti
NIP 19780819 200212 2 003

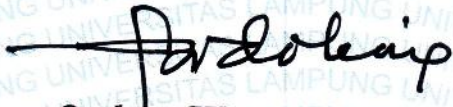
2. Ketua Jurusan Kimia

Prof. Dr. Mita Bilyanti, S.Si., M.Si.
NIP 19720530 200003 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua


: **Prof. Dr. Drs. Hardoko Insan Kudus, SU.**

Sekretaris

: **Prof. Dr. Eng. Widi Astuti** 

Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.** 

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **18 Mei 2026**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Jihan Nabilah Yulfira
Nomor Pokok Mahasiswa : 1917011098
Program Studi : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat, Suhu, Waktu, dan *Pulp Density* pada Pelindian Cobalt dari Katalis Bekas dengan Metode Hidrometalurgi”** adalah hasil pekerjaan saya sendiri, dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau di terbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, serta dapat diterima sebagai persyaratan penyelesaian studi pada Universitas atau Institut lainnya.

Bandar Lampung, 18 Mei 2026

Yang Menyatakan,



Jihan Nabilah Yulfira
NPM 1917011098

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Jihan Nabilah Yulfira, lahir di Jakarta pada tanggal 21 Juli 2001, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, putri dari pasangan Bapak Firmansyah dan Ibu Rohmawati. Saat ini penulis bertempat tinggal di Perum. Kartika Wanasari, Kecamatan Cibitung, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat.

Penulis menyelesaikan pendidikan mulai dari Taman Kanak-Kanak (TK) Cempaka Kartika pada tahun 2007, lalu melanjutkan SD Negeri 13 Wanasari dan lulus pada tahun 2013. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Seputih Banyak dan lulus pada tahun 2016. Selanjutnya, penulis melanjutkan Pendidikan di SMA Al Muslim Tambun dan lulus pada tahun 2019. Pada tahun 2019, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kimia, Program Studi S-1 Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung, melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis telah aktif berorganisasi. Organisasi yang pernah diikuti penulis dimulai dari Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) Unila sebagai Kader Muda Himaki (KAMI) dan anggota Biro Penerbitan (BP) pada tahun 2020. Selain itu, penulis mengikuti kegiatan sosial seperti Karya Wisata Ilmiah (KWI) BEM-FMIPA Unila pada tahun 2019. Penulis telah mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Puseurjaya, Karawang, Jawa Barat pada bulan Januari sampai Februari 2022 selama 40 hari. Setelah melaksanakan kegiatan KKN, penulis mengikuti Program Penelitian/Riset dari Merdeka Belajar

Kampus Merdeka (MBKM) pada bulan Februari hingga Mei 2022. Penulis pernah melaksanakan Magang di PT. URC Indonesia pada bulan Juni hingga Juli pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Balai Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Pada tahun 2023, penulis menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Hidro Elektro Metalurgi dan Laboratorium Analisa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang dengan judul **“Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat, Suhu, Waktu, dan *Pulp Density* pada Pelindian *Cobalt* dari Katalis Bekas dengan Metode Hidrometalurgi”**.

MOTTO

“Allah SWT tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kemampuannya”

(Q.S. Al-Baqarah: 286)

"Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan"

(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)

“It’s not how good you are, it’s how you want to be”

(Paul Arden)

“Hatiku tenang karena mengetahui bahwa apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukku tidak akan pernah melewatkanmu”

(Umar bin Khattab)

"Dan sungguh, hari kemudian (masa depan) itu lebih baik bagimu daripada yang permulaan (masa lalu). Dan sungguh, kelak Tuhanmu pasti memberikan karunia-Nya kepadamu, sehingga engkau menjadi puas (bahagia)"

(Q.S. Ad-Duha: 4-5)

PERSEMBAHAN



Alhamdulillah rabbil' alamin, puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Dengan kerendahan hati, Ku persembahkan karya sederhana ini sebagai wujud tanggung jawab kepada

Orang tuaku, Ayah Firmansyah dan Ibu Rohmawati, yang tiada henti mencurahkan kasih sayang, untaian doa, dukungan moral maupun material, serta motivasi terbesar bagi-Ku dalam menyelesaikan studi ini.

Keluarga besarku, Kakak Nada, Adek Dzaky, Sepupu, Uwa, Om, dan Tante, yang tiada henti memberikan semangat, motivasi, perhatian, serta dukungan moral yang sangat berarti bagi-Ku.

Pembimbing penelitianku, dengan segala rasa hormat kepada Bapak Prof. Dr. Drs. Hardoko Insan Qudus, SU., Ibu Prof. Dr. Eng. Widi Astuti, Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., **serta seluruh dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila** yang telah membimbing, mendidik, memberikan wawasan dan pengalaman kepada penulis dalam menyelesaikan pendidikan hingga Sarjana.

Sahabat dan seluruh teman-temanku, yang telah memberikan semangat, kebahagiaan dan pelajaran hidup, serta menemani proses perjalanan-Ku.

Almamater Tercinta, Universitas Lampung

SANWACANA

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah *rabbil'alam*, puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, semoga kita termasuk umatnya yang mendapat *syafa'at* beliau di yaumul akhir kelak, *aamiin yarabbal'alam*.

Skripsi yang berjudul “Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat, Suhu, Waktu, dan *Pulp Density* pada Pelindian *Cobalt* dari Katalis Bekas dengan Metode Hidrometalurgi”, merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung. Dalam pengerjaan dan penulisan skripsi ini, penulis menyadari prosesnya tidak lepas dari kesulitan dan rintangan. Namun, atas kemudahan yang diberikan oleh Allah SWT serta bantuan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak sehingga rintangan tersebut dapat dilalui.

Jazakumullahu Khairan Katsiran Wa Jazakumullah Ahsanal Jaza, sehingga dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Drs. Hardoko Insan Qudus, SU., selaku Pembimbing I yang telah memberikan segala ilmu, masukan, dan arahan selama memberikan bimbingan penelitian, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi dengan baik. Semoga Allah SWT catat sebagai amal jariyah dan dilimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya dalam kehidupan Bapak.

3. Ibu Prof. Dr. Eng. Widi Astuti, selaku Pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan arahan dengan penuh kelembutan, kesabaran, dan keikhlasan selama bimbingan penelitian, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Semoga Allah SWT melimpahkan kebaikan dalam segala urusan pada kehidupan Ibu dan selalu diberikan kesehatan.
4. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., selaku Pembahas dalam penelitian. Terima kasih atas segala ilmu, masukan, arahan, dan dukungan yang baik selama memberikan bimbingan penelitian. Semoga Allah SWT mempermudah segala hal dalam urusan Bapak.
5. Ibu Dra. Aspita Laila, M.S. dan Bapak Dr. Sonny Widiarto., S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang memberikan dukungan dan arahan kepada penulis dari awal hingga menyelesaikan studi di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung
6. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas segala bantuan, dukungan, dan arahan yang telah diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Ibu Dr. Dian Herasari, S.Si., M.Si., selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila yang telah membimbing, mendidik, memberikan wawasan dan pengalaman selama menempuh perkuliahan.
10. Kedua orang tua yang tiada henti mendoakan penulis, Bapak Firmansyah dan Ibu Rohmawati yang mencurahkan kasih sayang, semangat, serta dukungan moral maupun material yang menjadi motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan studi ini. Bapak dan Ibu terima kasih atas hal yang telah diusahakan dan diberikan kepada penulis, segala upaya pun tak dapat membalas segala jasa-jasamu.
11. Kakak dan adik yang telah menemani proses dalam menyelesaikan skripsi, Balqis Nada Melfirosha dan Adzin Dzaky Dzahabiyah terima kasih atas bantuan, semangat, dan dukungan yang selama ini telah diberikan.

12. Keluarga besar penulis (Sepupu, Om, Tante, dan Uwa), terima kasih atas dukungan moral dan doa yang selalu diberikan kepada penulis.
13. Sahabat kecil (Syifa, Nain, Caca), yang selalu menemani proses perjalanan hidup penulis, terima kasih atas kebersamaan, kebahagiaan, serta dukungan dan motivasi kepada penulis. Semoga hidup kita selalu diberikan kemudahan dan sukses selalu.
14. Sahabat dekat (Anggi dan Ica), yang telah kebersamai penulis dalam berbagi kebahagiaan, terima kasih atas segala perhatian, pengertian, semangat, afirmasi positif, dukungan, dan hal-hal baik yang pernah diberikan kepada penulis. Semoga kebahagiaan selalu mengiringi perjalanan hidup kita.
15. Sahabat Als x Nab (Ahda, Rara, Ulpa, Rijah, Cella), yang telah kebersamai penulis selama masa perkuliahan terima kasih atas segala kenangan baik, bantuan, dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis, semoga Allah SWT memberikan balasan kebaikan.
16. Sahabat kuliah (Bellia, Melati, Ayu, Cici, Kania), terima kasih telah kebersamai dan memberikan bantuan kepada penulis selama masa perkuliahan. Semoga Allah SWT melimpahkan segala kebaikan dalam kehidupan.
17. Teman yang menemani proses dalam menyelesaikan skripsi, Dian terima kasih atas arahan dan bantuannya. Ify dan Yana terima kasih sudah berjuang untuk menyelesaikan skripsi ini.
18. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyusun skripsi ini. Teman KKN, Magang, dan PKL terima kasih atas segala bantuan, arahan, dukungan selama perkuliahan.
19. Keluarga besar Kimia angkatan 2019, terima kasih atas segala kenangan dan bantuan selama menjalani perkuliahan. *We are smart people, smart thinking, and good attitude.*
20. Almamater tercinta, Universitas Lampung.
21. *Last but not least, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for being me at all times.*

Akhir kata, semoga Allah SWT membalasnya dengan pahala yang berlipat-lipat ganda atas segala kebaikan yang telah diberikan. Penulis menyadari bahwa penulisan dalam skripsi ini belum sempurna. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna sebagaimana mestinya bagi pembaca pada umumnya.
Aamiin Allahumma Aamiin.

Bandar Lampung, 18 Mei 2026
Yang Menyatakan

Jihan Nabilah Yulfira
NPM 1917011098

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Cobalt</i>	6
2.2 Asam Sitrat.....	8
2.3 Pelindian <i>Cobalt</i> dari Katalis Bekas dengan Katalis Bekas Menggunakan Metode Hidrometalurgi.....	10
2.4 Analisis dan Karakterisasi <i>Cobalt</i>	11
2.4.1 <i>Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)</i>	11
2.4.2 <i>X-ray Fluorecence (XRF)</i>	12
2.5 Kinetika Reaksi Pelindian <i>Cobalt</i>	13

III. METODE PENELITIAN	15
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.2 Alat dan Bahan.....	15
3.3 Prosedur Penelitian	16
3.3.1 Penyiapan Bahan Baku.....	16
3.3.2 Pelindian <i>Cobalt</i> Menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$).....	17
3.4 Diagram Alir	18
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Pelindian <i>Cobalt</i> dari <i>Spent Catalyst</i>	19
4.1.1 Pengaruh Variasi <i>Pulp Density</i> terhadap <i>Cobalt Recovery</i>	21
4.1.2 Pengaruh Suhu terhadap <i>Cobalt Recovery</i>	23
4.1.3 Pengaruh Konsentrasi Agen Pelindian terhadap <i>Cobalt Recovery</i> ..	24
4.1.4 Pengaruh Variasi Waktu terhadap <i>Cobalt Recovery</i>	25
4.2 Pengaruh Pelindian <i>Duplo Cobalt</i> terhadap Residu <i>Spent Catalyst</i>	27
4.3 Studi Kinetika Reaksi	28
V. KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan	36
5.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN	44
1. Perhitungan Pembuatan Larutan Pelindian	45
2. Karakterisasi dengan AAS	50
3. Model Kinetika Reaksi	54
4. Dokumentasi Penelitian	54

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kandungan logam Co dalam <i>spent catalyst</i>	27
2. Kandungan logam Co dalam sampel <i>spent catalyst</i> hasil pelindian <i>duplo</i>	28
3. Hasil perhitungan <i>cobalt recovery</i> pada sampel pelindian	50
4. Hasil perhitungan fraksi konversi (x).....	54
5. Hasil perhitungan kontrol reaksi SCM.....	55
6. Hasil perhitungan kontrol difusi SCM	56
7. Hasil perhitungan plot Arrhenius $1/T$ (K^{-1}) terhadap $\ln k$ pada pelindian <i>duplo cobalt</i> (asam sitrat 1 M, <i>pulp density</i> 2,5%, dan suhu 60°C)	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pengaruh konsentrasi asam sitrat dan suhu pelindian pada <i>recovery</i> Co pada suhu 60°C	7
2. Struktur molekul asam sitrat	18
3. Pengaruh asam sitrat, asam sulfat, dan asam klorida terhadap hasil <i>recovery</i> logam Co (pH = 1,5; T = 90; t = 4 jam)	9
4. Perbandingan asam sitrat dan asam asetat terhadap hasil <i>recovery</i> logam Co ...	9
5. Diagram alir penelitian.....	18
6. Filtrat hasil pelindian <i>duplo cobalt</i>	19
7. Grafik pengaruh <i>pulp density</i> terhadap <i>cobalt recovery</i>	22
8. Grafik pengaruh suhu pelindian terhadap <i>cobalt recovery</i>	23
9. Grafik pengaruh konsentrasi asam sitrat terhadap <i>cobalt recovery</i>	24
10. Grafik pengaruh waktu pelindian terhadap <i>cobalt recovery</i>	26
11. <i>Shrinking Core Model</i> untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol reaksi kimia (asam sitrat 1 M dan <i>pulp density</i> 2,5%).....	29
12. <i>Shrinking Core Model</i> untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol reaksi kimia (suhu 60°C dan asam sitrat 1 M).....	30
13. <i>Shrinking Core Model</i> untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol reaksi kimia (suhu 60°C dan <i>pulp density</i> 2,5%).....	30
14. <i>Shrinking Core Model</i> untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol difusi (asam sitrat 1 M dan <i>pulp density</i> 2,5%).....	31

15. *Shrinking Core Model* untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol difusi (suhu 60°C dan asam sitrat 1 M)..... 31
16. *Shrinking Core Model* untuk kinetika pelindian Co dengan kontrol difusi (suhu 60°C dan *pulp density* 2,5%)..... 32
17. Grafik plot Arrhenius $1/T$ (K^{-1}) terhadap $\ln k$ pada pelindian *duplo cobalt* (asam sitrat 1 M, *pulp density* 2,5%, dan suhu 60°C)..... 33

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan industri pada berbagai sektor menyebabkan jumlah sampah cair maupun padat yang dihasilkan meningkat. Penanganan sampah padat dengan kandungan logam cenderung sulit dilakukan. Dalam berbagai sektor industri seperti petrokimia, logam, dan industri minyak, logam berharga memainkan peran penting. Sumber daya utama perolehan bahan baku logam berasal dari pertambangan mineral. Potensi cadangan mineral di Indonesia cukup besar. Peningkatan kebutuhan logam *aluable* terjadi setiap tahunnya, namun mineral sebagai sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (Sari *et al.*, 2018). Sumber sekunder limbah logam lainnya dapat berasal dari katalis bekas, minyak, dan limbah industri kimia. Biasanya dalam katalis bekas terdapat kandungan logam berat sehingga dikategorikan sebagai limbah berbahaya. Produksi katalis *hydroprocessing* bekas di seluruh dunia diperkirakan memiliki jumlah total berkisar antara 150.000 hingga 170.000 ton per tahun (Dufresne, 2007). Produk berharga dan pemurnian minyak bumi menjadi bahan bakar dapat dilakukan dengan menggunakan katalis padat berupa logam, oksida logam, atau sulfida, yang berakhir sebagai limbah padat. Berbagai cara dilakukan untuk mengatasi dampak buruk katalis bekas terhadap lingkungan dengan pengurangan pembuatan limbah katalis bekas seperti *recovery* logam, pemanfaatan untuk membuat bahan yang dapat digunakan, pengolahan untuk pembuangan yang aman, regenerasi dan penggunaan kembali dapat dilakukan untuk mengatasi ancaman katalis bekas terhadap lingkungan. Senyawa logam berharga seperti *cobalt* (Co), molibdenum (Mo), nikel (Ni), rhodium (Rh), vanadium (V), alumina (Al), platinum (Pt), dan sebagainya terdapat dalam katalis bekas dapat mengalami

recovery (Marafi and Stanislaus, 2008). Metode ekstraksi dan pemisahan logam efektif yang bergantung pada keberadaan konstituen lain biasanya dilakukan untuk *recovery* logam dari katalis bekas (Oza and Patel, 2011). Metode ekstraksi logam berat dari limbah bahan katalis pengolahan kilang telah dikembangkan (Shen *et al.*, 2012). *Recovery* katalis bekas memberikan hasil yang dapat dijual kembali sehingga dapat dijadikan referensi dalam pengolahan katalis bekas yang bermanfaat untuk mendapatkan bahan baku atau logam berharga yang diinginkan (Istiqomah *dkk.*, 2019).

Dua proses utama yang dapat dilakukan dalam *recovery* logam berharga dari katalis bekas, yaitu proses hidrometalurgi dan hidropirometalurgi. Proses yang digunakan tergantung pada keberadaan dan komposisi konstituen yang ada dalam bahan (Marafi and Rana, 2016). Proses hidrometalurgi dengan menggunakan larutan basa atau asam, seperti asam oksalat dengan H_2O_2 , $(NH_4)_2SO_4$, NaOH, $Fe(NO_3)_2$, H_2SO_4 , NH_3 dalam proses pelindian. Sedangkan pada proses hidropirometalurgi terjadi kalsinasi untuk menghilangkan hidrokarbon, C dan S yang dilanjutkan dengan reagen yang tepat untuk proses pelindian atau pemanggangan katalis bekas pada suhu tinggi dengan Na_2CO_3 , NaCl dan NaOH yang dilanjutkan dengan proses pelindian diketahui dapat dilakukan untuk *recovery* logam dari katalis HDS bekas (Mohammed *et al.*, 2011). Proses pelindian termasuk hidrometalurgi dengan melibatkan pembubaran selektif logam dari bahan. Proses pelindian atau pemisahan logam dan penggunaan bahan kimia berair, baik asam maupun basa dilakukan pada suhu yang jauh lebih rendah (Marafi and Rana, 2016). Agen pelindian atau pelarut untuk ekstraksi biasanya menggunakan asam (Istiqomah *dkk.*, 2019). Hal ini menyebabkan berbagai parameter seperti konsentrasi larutan, suhu ekstraksi, pH larutan, kecepatan pengadukan, jenis reagen yang digunakan, dan waktu ekstraksi dilakukan pada beberapa jenis penelitian untuk mengetahui pengaruhnya pada efisiensi pelindian (Baral *et al.*, 2014).

Cobalt dan Molibdenum banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti filamen, paduan baja, motor industri, suku cadang pesawat, tingkat pigmen, dan

pembuatan baju besi (Barik *et al.*, 2012). Wiecka *et al.*, (2020) dalam penelitiannya menggunakan proses *recovery* hidrometalurgi pada *Cobalt(II)* dari katalis hidrodeshulfurisasi bekas dengan proses pelindian hidrometalurgi dan ekstraksi yang optimal. Katalis hidrodeshulfurisasi bekas diproduksi per tahun dalam jumlah sekitar 120.000 ton (basis kering). Pembuangan limbah residu di masa lalu tidak lagi direkomendasikan karena undang-undang yang ketat (Pinto and Soares, 2012). Dalam industri penyulingan minyak bumi selama operasi banyak digunakan katalis hidrodeshulfurisasi (HDS) dengan menonaktifkan pengendapan karbon, belerang dan logam (V, Fe, Zn, dan As) (Lai *et al.*, 2008). Biasanya reaksi hidrodeshulfurisasi yang terjadi di industri minyak bumi menggunakan katalis $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$, dimana katalis CoMo lebih baik dari NiMo jika diamati dari berkurangnya *surface area* dan volume pori (Musta, 2011).

Penelitian beberapa tahun terakhir membuktikan proses mengolah katalis HDS bekas dengan *ultrasound* dapat meningkatkan laju reaksi kimia sehingga ramah lingkungan dan hemat biaya. Logam yang telah berhasil diekstraksi dari lumpur limbah yang berasal dari instalasi pengolahan air limbah dengan energi ultrasonik dari *ultrasonic probe* (UP) dengan sonotrode kaca (amplitudo sonikasi 80%, frekuensi sonikasi 20 kHz, 500 W, waktu sonikasi 20 menit, larutan ekstraksi $\text{HNO}_3 : \text{HCl} 1 : 1$ v/v), diantaranya logam Co, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, dan Zn (Capelo-Martínez, 2009). Ekstraksi ultrasonikasi dalam ekstraksi senyawa bahan alam mudah dan ekonomis sehingga menjadi alternatif yang banyak dipilih. Ultrasonikasi menggunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi gelombang suara di atas 20 kHz. Metode ultrasonikasi sebagai salah satu metode ekstraksi senyawa bahan alam yang dapat diaplikasikan karena bersifat *non-destructive* (Lestari, 2018). Salisova *et al.*, (1997) dalam penelitiannya telah melakukan perbandingan antara metode konvensional dan metode ultrasonikasi dalam ekstraksi senyawa aktif yang menunjukkan bahwa waktu ekstraksi lebih singkat dan ekstraksi lebih efisien pada metode ekstraksi ultrasonikasi dibandingkan dengan metode konvensional.

Hasil pelindian dapat dipengaruhi oleh jenis asam yang digunakan. Asam sitrat, asam asetat, dan asam oksalat termasuk asam organik yang sering digunakan untuk leaching katalis bekas. Asam sitrat dengan satu gugus hidroksil yang dapat membentuk kelat yang stabil dengan logam berat dan tiga gugus karboksilat. Asam sitrat juga tergolong ke dalam zat pengkelat yang *biodegradable* dan aman bagi lingkungan. Pengaruh konsentrasi asam sitrat dan suhu pelindian pada pemulihan Co dan Mo dieksplorasi. Penelitian membuktikan peningkatan konsentrasi asam sitrat, suhu pelindian, dan waktu pelindian akan membuat hasil *recovery* Co dan Mo meningkat (Nugroho *et al.*, 2021).

Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini dilakukan ekstraksi *cobalt* dari katalis bekas dengan metode hidrometalurgi. Pada penelitian ini akan dilakukan pelindian *cobalt* dari katalis bekas menggunakan asam sitrat sebagai reagen untuk mempelajari pengaruh konsentrasi asam sitrat, suhu pelindian, waktu pelindian, dan *pulp density* (rasio berat katalis bekas/volume asam sitrat) terhadap persen *cobalt recovery* pada filtrat hasil pelindian dan kinetika reaksi pelindian *cobalt*.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut:

1. Menentukan kondisi optimum proses pelindian *cobalt* dari *spent catalyst* melalui pelindian *duplo* menggunakan Na_2CO_3 dan asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) dengan metode hidrometalurgi menggunakan ultrasonik berdasarkan variasi konsentrasi asam sitrat, *pulp density*, suhu, dan waktu pelindian.
2. Menentukan model kinetika reaksi pelindian *cobalt* dari *spent catalyst* menggunakan pendekatan *Shrinking Core Model* (SCM) serta mengkaji mekanisme pengendalian laju reaksi berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) dan energi aktivasi (E_a).
3. Mengidentifikasi distribusi kandungan *cobalt* pada filtrat dan residu hasil pelindian melalui karakterisasi AAS dan XRF untuk mengevaluasi efektivitas proses pelindian *duplo*.

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian yang akan diperoleh diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

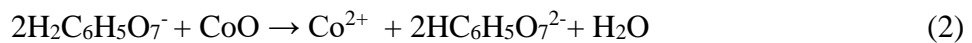
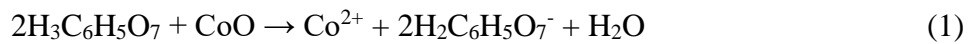
1. Memberikan informasi mengenai penggunaan metode hidrometalurgi dari katalis bekas dalam pelindian *Cobalt*.
2. Memberikan informasi dalam pembuatan pabrik produsen *Cobalt* di Indonesia menggunakan metode hidrometalurgi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

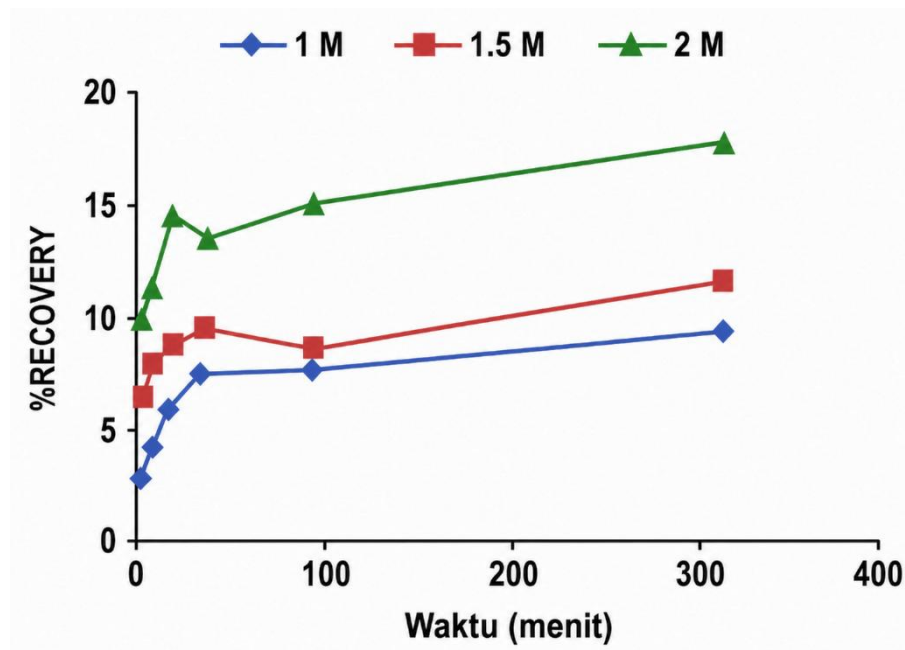
2.1 Cobalt

Cobalt adalah unsur yang relatif langka yang menyusun sekitar 0,001% dari kerak bumi yang memiliki sifat yang mirip dengan besi dan nikel. Semua isotop radioaktif utama ^{57}Co , ^{58}Co , dan ^{60}Co meluruh dan melepaskan sinar dengan waktu paruh 272 hari, 71 hari, dan 5,271 tahun. Logam *cobalt* murni memiliki sifat magnetik dan berwarna abu-abu baja. Logam *cobalt* murni juga berkilau, keras, elastis, dan rapuh. Bilangan oksidasi utama yang paling stabil dari senyawa ini *Cobalt(II)* atau *Cobalt(III)*. Logam *cobalt*, paduannya, dan bahan komposit, oksida *cobalt* dan tetraoksida, dan garam *cobalt(II)* klorida, sulfida, dan sulfat adalah senyawa utama yang menjadi perhatian toksikologi. Format, asetat, sitrat, naftenat, linoleat, oleat, oksalat, resinat, stearat, suksinat, sulfamat, dan 2-etilheksanoat adalah beberapa garam Co(II) yang paling signifikan dari asam karboksilat. Bentuk padat dari *cobalt* karbonil $[\text{Co}_2(\text{CO})_8]$ biasanya berwarna dari jingga sampai coklat. Jumlah rata-rata *cobalt* dalam tubuh orang dewasa dengan berat 70 kg adalah 1,1 mg dan 85% dari jumlah itu ditemukan dalam bentuk vitamin B_{12} . Konsentrasi plasma *cobalt* dan vitamin B_{12} masing-masing normalnya pada $<200\text{pg/mL}$ dan $200\text{-}900\text{pg/mL}$. Meskipun partikel logam *cobalt* pada dasarnya tidak larut dalam air, tetapi partikel *cobalt* secara signifikan lebih larut dalam cairan biologis. Hal ini karena ikatan substansial ion Co(II) dengan protein ($152,5\text{ mg/L}$ dalam plasma manusia pada 37°C dibandingkan dengan $0,003\text{ mg/L}$ dalam garam fisiologis) (Lison, 2015).

Pada tahap pemurnian, bahan baku *cobalt* diproses lebih lanjut untuk membuat senyawa *cobalt* dan turunannya. Saat ini, hidrometalurgi adalah proses pemurnian yang paling populer. Dalam pemurnian hidrometalurgi, bahan mentah atau limbah *cobalt* dilarutkan dalam larutan, pengotor dihilangkan menggunakan teknik pemurnian atau ekstraksi kimia, dan senyawa *cobalt* yang dimurnikan telah diproduksi (Qiao *et al.*, 2022). Telah dilakukan penelitian (Nugroho *et al.*, 2021) *cobalt* dengan asam sitrat yang menghasilkan reaksi sebagai berikut:



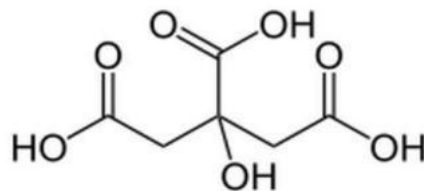
Pengaruh konsentrasi asam sitrat dan suhu pelindian pada Co *recovery* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengaruh konsentrasi asam sitrat dan suhu pelindian pada Co *recovery* pada suhu 60°C (Nugroho *et al.*, 2021)

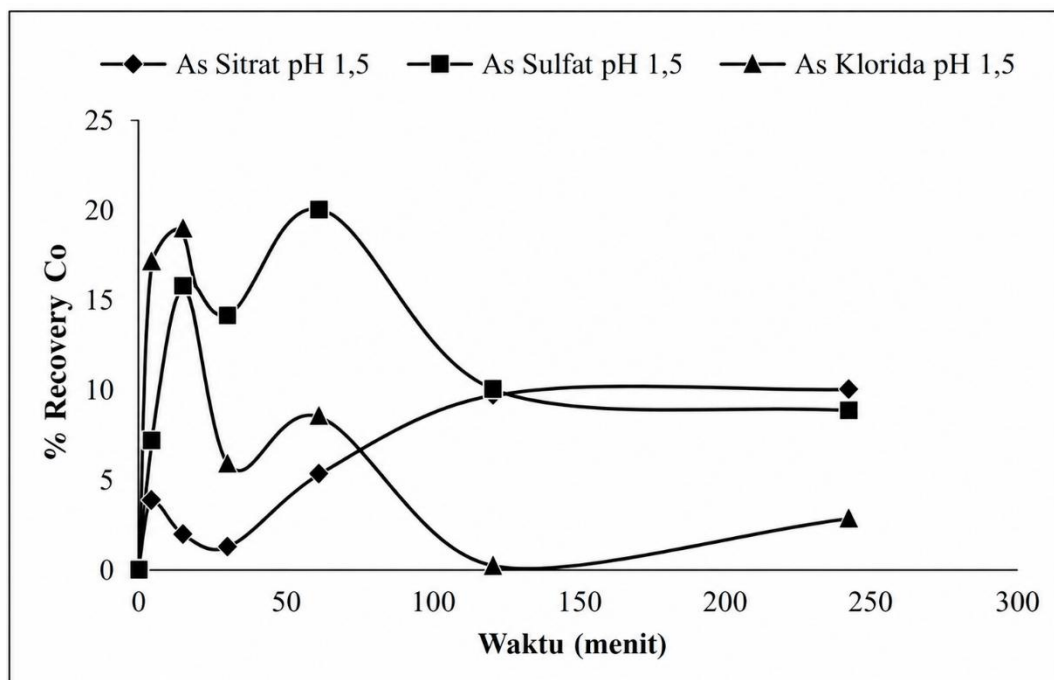
2.2 Asam Sitrat

Asam sitrat memiliki tiga gugus karboksilat (-COOH) dan satu gugus hidroksil (-OH). Asam sitrat termasuk zat pengkelat yang *biodegradable* dan aman bagi lingkungan yang dapat membentuk kelat yang stabil dengan logam berat (Huang *et al.*, 2011). Zat pengkelat sebagai zat ekstraktan yang paling efektif untuk meningkatkan ekstraksi logam berat (Oza and Patel, 2011). Asam trikarboksilat lemah yang ditemukan dalam buah jeruk seperti lemon memiliki kandungan asam sitrat 7-9% sesuai dengan berat keringnya. Asam sitrat monohidrat memiliki tiga gugus karboksilat (-COOH) dengan nilai pKa yang berbeda, yaitu 3,15; 4,78; dan 6,4. *Buffering*, agen kelat dalam industri makanan dan minuman, dan penyedap rasa merupakan beberapa aplikasi asam sitrat. Bentuk asam sitrat yang biasa dijual di pasar komersial adalah asam sitrat monohidrat yang diproduksi melalui kristalisasi dingin dengan larutan jenuh yang mengalami penguapan secara lambat. Sedangkan pada asam sitrat anhidrat, dihasilkan dari larutan asam sitrat yang jenuh dan panas. Struktur molekul asam sitrat dapat dilihat pada Gambar 2.

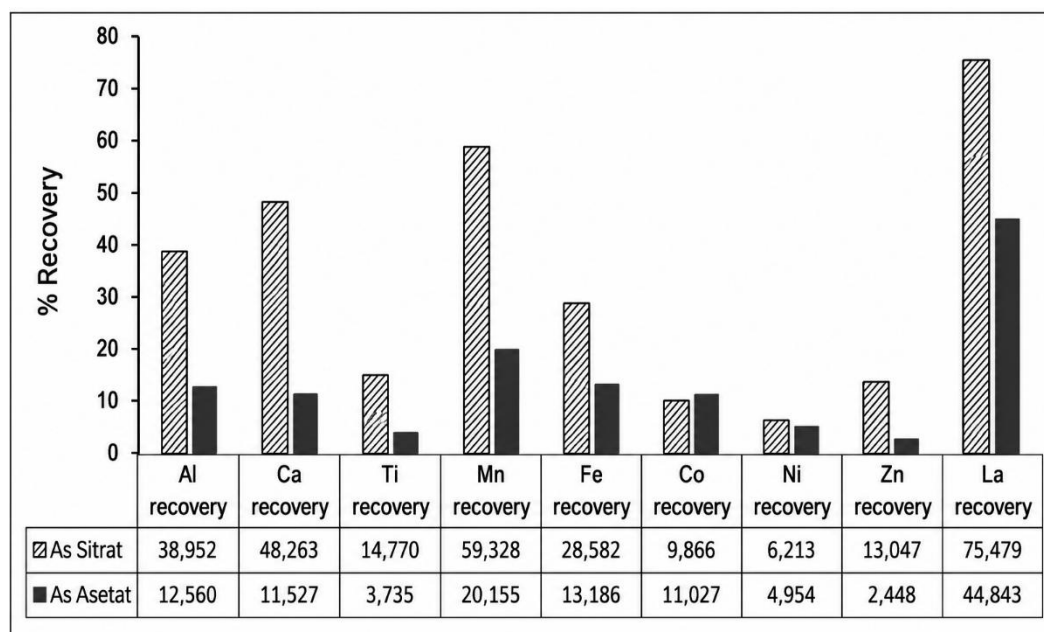


Gambar 2. Struktur molekul asam sitrat (Lambros *et al.*, 2022).

Telah dilakukan penelitian Sari *et al.*, (2018) asam sitrat yang menghasilkan jumlah *recovery* logam yang sangat baik dibandingkan dengan asam asetat, asam sulfat ataupun asam klorida. Hal ini disebabkan oleh kemampuan disosiasi asam yang sangat baik dibandingkan dengan asam organik lainnya, sehingga jumlah pKa yang lebih tinggi dimiliki oleh asam sitrat sebagai asam organik. Pengaruh asam sitrat, asam sulfat, dan asam klorida terhadap hasil *recovery* logam Co dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Pengaruh asam sitrat, asam sulfat, dan asam klorida terhadap hasil *recovery* logam Co (pH = 1,5; T = 90; t = 4 jam)



Gambar 4. Perbandingan asam sitrat dan asam asetat terhadap hasil *recovery* logam Co

2.3 Pelindian *Cobalt* dari Katalis Bekas dengan Katalis Bekas Menggunakan Metode Hidrometalurgi

Metode hidrometalurgi adalah proses ekstraksi senyawa dari mineral. Hidrometalurgi menggunakan larutan kimia saat *recovery* senyawa dari mineral, konsentrat dan residunya, yang termasuk ke dalam teknik metalurgi ekstraktif. Pirometalurgi, elektrometalurgi garam cair, dan metalurgi uap termasuk teknik pengolahan kimia yang melengkapi metalurgi. Tiga tahapan dasar pada hidrometalurgi adalah pelindian, purifikasi, dan *recovery* (Muharrom, 2018). Salah satu alternatif pengolahan limbah yang layak adalah proses ekstraksi padat-cair (pelindian). Menemukan pelarut yang selektif untuk jenis logam tertentu yang akan diproses atau dipulihkan masih menjadi kendala dalam proses ini (Kurniawan *et al.*, 2010). Pelindian saat tahap pertama diekstrak logam menggunakan larutan kimia. Tahap kedua adalah purifikasi menggunakan pelarut dengan ekstrak yang dicampurkan dalam pengencer yang akan digunakan untuk mengekstrak logam dari satu fase ke fase lain. Langkah terakhir dalam hidrometalurgi adalah proses *recovery*. Pada proses *recovery*, diproduksi hasil logam yang didapatkan sebagai bahan baku dan sebagian lainnya ditingkatkan kemurnian dengan proses lanjutan. Elektrolisis, reduksi gas, dan pengendapan sebagai proses dalam bentuk *recovery* (Muharrom, 2018).

Katalis bekas (*spent catalyst*) adalah katalis padat yang telah jenuh dan tidak dapat lagi digunakan secara efektif dalam reaksi kimia. Kandungan unsur logam berat seperti aluminium (Al), besi (Fe), *cobalt* (Co), molibdenum (Mo), nikel (Ni), dan vanadium (V) masih ada dalam katalis ini meskipun sudah tidak digunakan lagi (Marafi and Stanislaus, 2008). Kandungan unsur logam berat yang masih ada dalam katalis bekas menjadikan katalis bekas termasuk limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) jika tanpa diolah terlebih dahulu sebelum katalis dibuang ke lingkungan. Proses hidrometalurgi telah dipelajari oleh beberapa peneliti sebagai salah satu metode dalam mengolah katalis bekas. Katalis bekas diolah secara hidrometalurgi untuk mengekstraksi kandungan ion logam yang masih ada dalam katalis. Selain untuk menjaga lingkungan, pengolahan katalis bekas juga

dilakukan untuk memenuhi kebutuhan unsur logam dari sumber mineral sekunder di masa mendatang (Wanta *dkk*, 2019).

Metode hidrometalurgi dengan asam sitrat sebagai agen pelindian yang diterapkan dalam penelitian ini digunakan untuk *recovery* logam *cobalt* (Co) dan molibdenum (Mo) dari katalis CoMo bekas. Penelitian ini membuktikan bahwa peningkatan konsentrasi asam sitrat, suhu pelindian, dan waktu pelindian akan membuat hasil *recovery* Co dan Mo meningkat (Nugroho *et al.*, 2021). Yan *et al.*, (2014) dalam penelitiannya menyimpulkan *recovery* asam organik lebih tinggi berada pada pH yang sama. Perbandingan dilakukan terhadap hasil *recovery* pada jenis asam organik (asam sitrat) dan asam anorganik (asam klorida dan asam sulfat). Reagen yang digunakan dalam pelindian diurutkan sebagai berikut: sitrat = tartarat > glioksilat > laktat > asam glikolat > air > glioksal (Garole *et al.*, 2020).

2.4 Analisis dan Karakterisasi Cobalt

Penelitian ini dilakukan analisis dan karakterisasi *cobalt* dengan menggunakan alat berupa *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dan *X-Ray Fluorecence* (XRF).

2.4.1 Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)

Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) adalah instrument analisis kimia dengan prinsip penyerapan energi dari atom. Radiasi yang diserap oleh atom akan menyebabkan keadaan energi elektronik yang tereksitasi. Prinsip spektrofotometri serapan atom (AAS) adalah elektron pada atom menyerap energi berupa radiasi dengan panjang gelombang spesifik, sehingga tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi dalam waktu singkat (Sugito dan Marliyana,

2021). Absorpsi radiasi oleh atom bebas (analit yang terlepas dari ikatan kimia tetapi belum terionisasi) pada nyala terjadi melalui perpindahan elektron dari tingkat energi dasar menuju tingkat energi tereksitasi. Walaupun perpindahan elektronik lain juga dapat terjadi, spektrum serapan atom umumnya ditandai oleh sejumlah garis resonansi yang berasal dari keadaan dasar menuju tingkat tereksitasi rendah. Garis resonansi pertama merupakan garis dengan daya serap paling kuat. Intensitas absorpsi menurun seiring bertambahnya selisih energi antara keadaan dasar dan tingkat tereksitasi yang lebih tinggi. Salah satu metode analisa yang paling banyak digunakan dalam untuk analisis logam metalurgi adalah AAS. AAS memiliki batas deteksi yang rendah, pengoperasian yang mudah, tersebar luas, rendah biaya untuk analisa tiap sampelnya, dan memiliki ketelitian yang tinggi (Sugito dan Setiawan, 2022). Hal ini yang menyebabkan metode analisa AAS paling banyak digunakan untuk mengetahui kandungan logam yang terdapat dalam larutan, seperti *cobalt*, besi, dan tembaga (Chen *et al.*, 2016).

2.4.2 X-ray Fluorescence (XRF)

Analisis XRF adalah contoh analisis yang didasarkan pada perilaku atom yang terpapar radiasi. Intensitas cahaya yang berinteraksi dengan atom-atom mempengaruhi berbagai fenomena yang timbul dari interaksi atom dengan cahaya. Elektron terpental dari tingkat energi terendah dalam atom disebabkan karena material berinteraksi dengan cahaya yang mempunyai energi tinggi, seperti sinar-X. Akibatnya elektron yang berada pada tingkat (kulit valensi) yang lebih tinggi akan mengisi posisi kosong yang ditinggalkan oleh elektron yang terpental karena atom berada pada keadaan yang tidak stabil. Deeksitasi adalah proses pengisian situs elektron di kulit valensi rendah yang disertai dengan pemancaran cahaya dengan energi yang lebih kecil dari energi yang menyebabkan elektron tereksitasi. Energi yang dipancarkan ini disebut radiasi fluoresensi. Energi yang khas pada radiasi fluoresensi bergantung pada eksitasi elektronnya dan deeksitasi pada atom penyusun sebuah material. Karakteristik radiasi fluoresensi pada setiap

unsur yang khas yang memungkinkan terjadinya analisa kualitatif untuk identifikasi unsur-unsur berbeda. Berdasarkan intensitas dari radiasi fluoresensi yang dipancarkan, dapat dilakukan penentuan konsentrasi dari unsur yang dianalisis sebagai analisa kuantitatif (Setiabudi *dkk.*, 2012). Nadeak *dkk.*, (2017) dalam penelitiannya melakukan analisa XRF untuk mengetahui kadar unsur yang terkandung dalam residu akhir proses pelindian asam.

2.5 Kinetika Reaksi Pelindian *Cobalt*

Rezki *et al.*, (2021) dalam penelitiannya melakukan studi kinetika proses pelindian katalis bekas dengan asam sitrat pada pH 1,5 selama 120 menit. Data kinetika yang diperoleh dapat digunakan untuk pengujian mekanisme reaksi antara partikel katalis bekas dengan larutan pelindian asam sitrat. Model reaksi heterogen digunakan untuk menjelaskan kinetika reaksi pada proses pelindian yang terdiri dari fase padat dan fase cair. Penentuan pengukuran kuantitatif dari kinetika dan mekanisme pelindian penting dilakukan untuk mengontrol proses pelindian. Analisis pada data eksperimen yang ada menjelaskan beberapa model yang menghubungkan fraksi reaksi (x) dan waktu (t). Proses difusi atau reaksi kimia pada permukaan partikel biasanya digunakan untuk mengendalikan sistem reaksi cair-padat. Yagi dan Kunii yang pertama kali memperkenalkan model *shrinking core* yang memvisualisasikan persamaan konversi untuk partikel berbentuk bola dengan beberapa langkah yang terjadi selama reaksi. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Film cair untuk melakukan proses difusi reaktan di sekitar permukaan partikel padat.
2. Lapisan abu pada permukaan inti tidak bereaksi saat difusi reaktan.
3. Pada permukaan reaksi terjadi reaksi reaktan dengan padatan.

Persamaan laju reaksi yang akan dihasilkan dengan kontrol reaksi kimia sebagai berikut:

$$1 - (1 - x)^{1/3} = k_r t \quad (4)$$

Persamaan laju reaksi jika proses difusi melalui kontrol lapisan abu sebagai berikut:

$$1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x) = k_d t \quad (5)$$

Keterangan:

x = konversi reaktan yang diwakili oleh pemulihan mangan

k_r = parameter kinetik untuk kontrol reaksi permukaan

k_d = parameter kinetik untuk difusi melalui kontrol lapisan abu

t = waktu reaksi dalam menit

Data eksperimen menggunakan pemodelan kinetik yang dilengkapi model reaksi padat-cair. Korelasi Arrhenius dapat digunakan untuk menghitung energi aktivasi sebagai berikut :

$$k_c = A e^{-E_a/RT} \quad (6)$$

Keterangan:

k_c = konstanta laju

A = frekuensi tumbukan

E_a = energi aktivasi

R = konstanta gas universal

T = suhu mutlak

Persamaan Arrhenius disusun kembali menjadi persamaan linier untuk *plotting* sebagai berikut:

$$\ln k_c = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \quad (7)$$

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Mei 2023 hingga September 2023 bertempat di Laboratorium Hidro Elektro Metalurgi dan Analisis XRF dan AAS di Laboratorium Analisa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) di Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah neraca analitik, botol vial, botol duran, gelas beaker, gelas ukur 100 mL, labu ukur 500 dan 1000 mL, Erlenemeyer 250 mL, pipet tetes, batang pengaduk, spatula, *hot plate*, plastik *wrap*, corong *Buchner*, mortar, cawan porselen, *furnace*, *ball mill*, *ultrasonic cleaner*, *X-Ray Flourescence (XRF)*, dan *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)*.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis bekas, akuades, Na_2CO_3 , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, HNO_3 2%, kertas saring, dan indikator pH.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Penyiapan Bahan Baku

Larutan yang digunakan untuk proses *leaching*, yaitu larutan Na_2CO_3 1 M dan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 0,5; 1; dan 1,5 M. Pembuatan larutan Na_2CO_3 1 M dengan cara menimbang padatan Na_2CO_3 seberat 105,99 g/mol yang dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda tera. Pembuatan larutan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 0,5 M dengan cara menimbang padatan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ seberat 105,07 g/mol yang dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda tera. Pembuatan larutan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 1 M dengan cara menimbang padatan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ seberat 210,14 g/mol yang dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda tera. Pembuatan larutan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 1,5 M dengan cara menimbang padatan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ seberat 315,21 g/mol yang dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda tera.

Pada penelitian ini, dilakukan pemanasan menggunakan *furnace* pada limbah katalis bekas dengan suhu 60°C selama 120 menit pada kecepatan 500 rpm. *Furnace* ini dilakukan untuk meningkatkan kemurnian *cobalt* dalam katalis bekas dengan memecah ikatan-ikatan kimia antara logam *cobalt* dan komponen lain. *Spent catalyst* yang dipanaskan dengan *furnace* dilanjutkan dengan pendinginan pada suhu ruang. Setelah didinginkan, *spent catalyst* dihaluskan dengan *ball mill* yang berfungsi untuk mengubah partikel menjadi lebih halus dan seragam sehingga meningkatkan luas permukaan *spent catalyst*. Sampel yang telah digiling dengan *ball mill* memiliki partikel yang lebih kecil sehingga meningkatkan luas permukaan sampel yang mempercepat reaksi logam *cobalt* dengan agen pelindi. Hasil *spent catalyst* yang telah dihaluskan digunakan untuk pelindian *duplo cobalt* dengan agen pelindi Na_2CO_3 yang dilanjutkan dengan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ sebagai agen pelindi *duplo* pada variasi konsentrasi, suhu, waktu, dan *pulp density*.

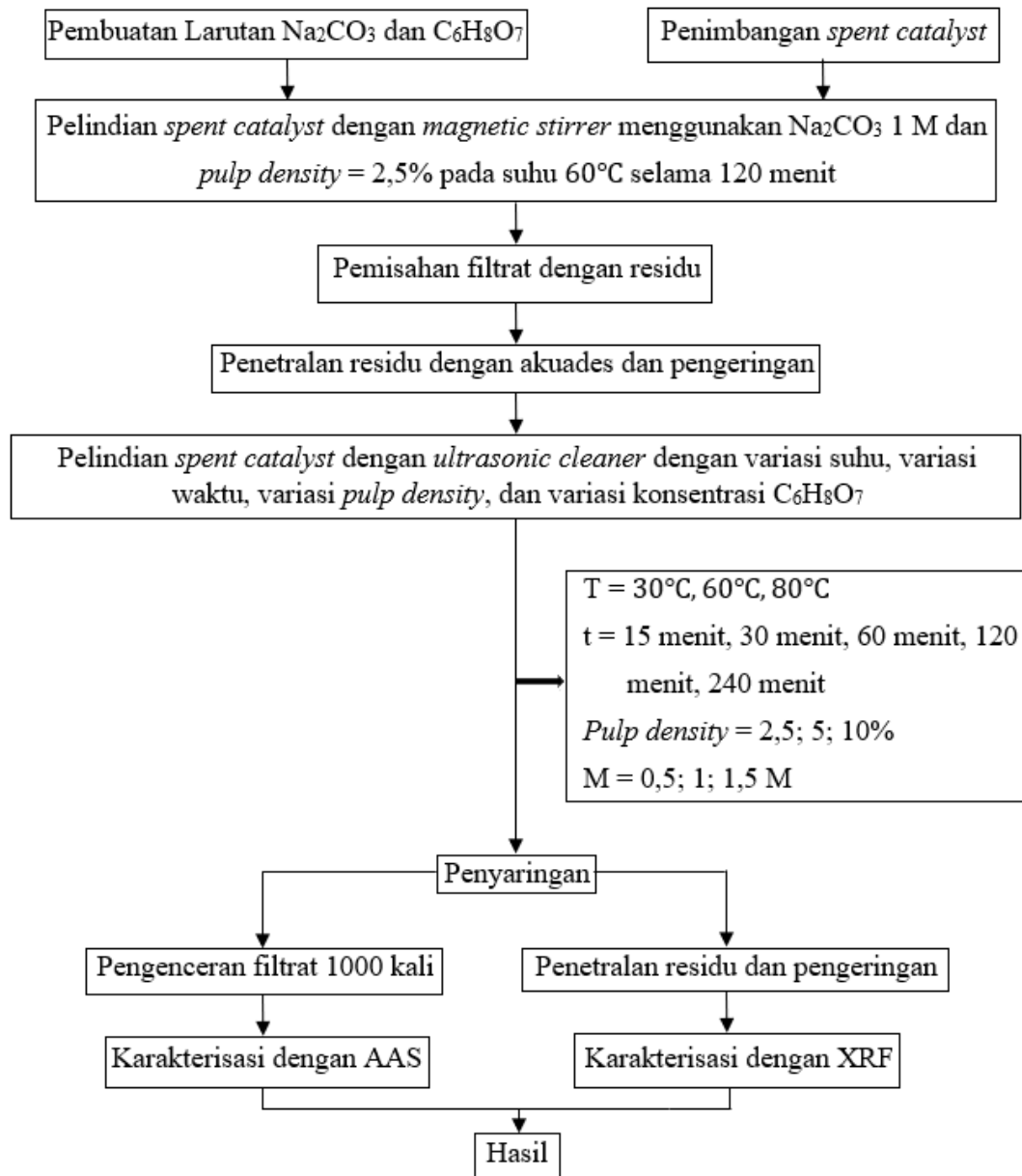
3.3.2 Pelindian *Cobalt* Menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$)

Pada saat pelindian pertama dengan Na_2CO_3 , dilakukan pembuatan larutan Na_2CO_3 1 M dengan *pulp density* 2,5% dari berat sampel pelindian yang akan digunakan. Pelindian sampel dengan menggunakan katalis bekas sebanyak 25 g dimasukkan ke dalam 1000 mL larutan Na_2CO_3 1 M pada gelas beaker sambil pengadukan. Sampel tersebut dilakukan pelindian dengan *hot plate* dalam suhu 60 °C selama 120 menit. Setelah itu, dilakukan penyaringan sampel dengan corong *Buchner* pada Erlenmeyer 250 mL. Sebelum residu dianalisis karakterisasi, dilakukan pencucian residu dengan akuades untuk menghilangkan sisa-sisa pelarut yang terkandung saat proses pelindian hingga mencapai pH netral. Kemudian dilakukan pengeringan terhadap residu yang telah mencapai pH netral. Proses pelindian ini dilakukan hingga sampel residu mencapai 100 g yang akan digunakan untuk pelindian $C_6H_8O_7$.

Pada saat pelindian *duplo* dengan $C_6H_8O_7$, dilakukan pembuatan larutan $C_6H_8O_7$ dengan variasi konsentrasi 0,5; 1; dan 1,5 M. Pelindian sampel menggunakan katalis bekas dengan variasi *pulp density* 2,5; 5; dan 10% dari berat sampel pelindian yang akan digunakan (berat katalis bekas/volume larutan asam sitrat). Katalis bekas yang digunakan berasal dari hasil residu saat pelindian Na_2CO_3 1 M dengan *pulp density* 2,5% dalam suhu 60°C selama 120 menit. Sampel tersebut dimasukkan ke dalam *ultrasonic cleaner* dalam variasi suhu 30, 60, dan 80°C dengan variasi waktu yang digunakan selama 15, 30, 60, 120, dan 240 menit. Setelah itu, dilakukan penyaringan sampel dengan corong *Buchner* pada Erlenmeyer 250 mL. Sampel akan menghasilkan filtrat yang akan dianalisis dengan AAS dan residu yang akan dianalisis karakterisasi dengan XRF. Sebelum residu dianalisis karakterisasi, dilakukan pencucian residu dengan akuades untuk menghilangkan sisa-sisa pelarut yang terkandung saat proses pelindian hingga mencapai pH netral. Kemudian dilakukan pengeringan terhadap residu yang telah mencapai pH netral. Sedangkan filtrat yang didapatkan sebelum dilakukan AAS, dilakukan pengenceran dengan HNO_3 2%.

3.4 Diagram Alir

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini yaitu:

1. Hasil karakterisasi AAS menunjukkan kandungan logam Co yang memiliki hasil *recovery* terbesar 37,503; 37,275; dan 28,428% terdapat pada sampel filtrat pelindian *duplo* dengan Na_2CO_3 dan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ yang berada pada suhu optimum 60°C. Karakterisasi AAS menunjukkan hasil *recovery* optimum sebesar 37,275% terdapat pada sampel filtrat pelindian *duplo* dengan kondisi optimum pada konsentrasi $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ sebesar 1 M dengan *pulp density* 2,5% pada suhu 60°C selama 120 menit.
2. Hasil karakterisasi XRF menunjukkan kandungan logam Co yang terdapat pada sampel residu hasil pelindian *duplo* dengan Na_2CO_3 dan $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ sebesar 14,09; 14,16; dan 14,4% yang diambil dari ketiga sampel filtrat dengan hasil *cobalt recovery* terbesar.
3. Model kinetika *Shrinking Core Model* (SCM) difusi memiliki nilai R^2 yang lebih tinggi dibandingkan model reaksi kimia sebesar 0,998 yang diperoleh dari analisa data SCM variabel *pulp density* menunjukkan pelindian *cobalt* dari *spent catalyst* dikendalikan oleh laju difusi reagen melalui lapisan produk yang terbentuk di permukaan partikel *cobalt*. Hasil ini didukung oleh nilai energi aktivasi yang rendah sebesar 6,202 kJ mol⁻¹ (30°C – 60°C) dan -25,04 kJ mol⁻¹ (60°C – 80°C) yang menunjukkan karakteristik umum proses kontrol difusi. Energi aktivasi bernilai negatif disebabkan oleh konstanta laju yang tidak meningkat secara konsisten dengan kenaikan suhu.

5.2 Saran

Penelitian yang telah dilakukan dapat menghasilkan hasil *cobalt recovery* dari katalis bekas optimum sebesar 37,275% dengan pelindian *duplo* menggunakan asam sitrat dengan konsentrasi larutan 1 M, suhu 60°C, *pulp density* 2,5% dan waktu 120 menit dan asam sitrat dalam berbagai variasi konsentrasi, suhu, waktu, dan *pulp density*. Parameter pelindian katalis bekas yang sudah diamati adalah konsentrasi agen pelindi, suhu, waktu, dan *pulp density*. Berdasarkan hasil yang diperoleh, untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan kajian lebih lanjut terkait pelindian yang melibatkan *mixed control system* (reaksi kimia dan difusi) yang dapat mengontrol laju reaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaranggani, C. A., Susanti, R. F., Kristijarti, A. P., Astuti, W., Petrus, H. T. B. M., and Wanta. K. C. 2025. Leaching Co(II), Mo(VI), and Al(III) Ions from Spent Catalyst Co-Mo/ γ -Al₂O₃ Using Organic Acid. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 25(3): 536–549.
- Azuma, D., Aikawa, T., Hiraga, Y., Watanabe, M., and Smith, R. L. Jr. 2019. Kinetic Study of Hydrothermal Leaching of Lithium Cobalt Oxide with Citric Acid. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 45(4), 147–157.
- Baba, A. A., Adekola, F. A., and Bale, R. B. 2014. Development of A Combined Model for Leaching of Manganese from A Low-Grade Manganese Ore. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(5), 2498–2504.
- Baral, S. S., Shekar, K. R., Sharma, M., and Rao, P. V. 2014. Optimization of Leaching Parameters for the Extraction of Rare Earth Metal Using Decision Making Method. *Hydrometallurgy*, 143: 60–67.
- Barik, S. P., Park, K. H., Parhi, P. K., and Park, J. T. 2012. Direct Leaching of Molybdenum and Cobalt from Spent Hydrodesulphurization Catalyst with Sulphuric Acid. *Hydrometallurgy*, 111-112(1): 46–51.
- Capelo-Martínez, J. L. 2009. *Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications*. Wiley-VCH. Weinheim.
- Chen, G., Yang, H., Li, H., and Tong, L. 2016. Recovery of Cobalt as Cobalt Oxalate from Cobalt Tailings Using Moderately Thermophilic Bioleaching Technology and Selective Sequential. *Minerals*, 6(3), 67.
- Djoudi, N., Mostefa, M. L. P., and Muhr, H. 2021. Influence of Temperature on Cobalt Hydroxide Precipitation for Recovery from Battery Leachates. *Chemical Engineering & Technology*, 44(6), 962–971.

- Dufresne, P. 2007. Hydroprocessing Catalysts Regeneration and Recycling. *Applied Catalyst*, 322: 67–75.
- Faraji, F., Alizadeh, A., Rashchi, F., and Mostoufi, N. 2020. Kinetics of Leaching: A Review. *Reviews in Chemical Engineering*, 38(2), 113–148.
- Garole, D. J., Hossain, R., Garole, V.J., Sahajwalla, V., Nerkar, J., and Dubal, D.P. 2020. Recycle, Recover and Repurpose Strategy of Spent Li-ion Batteries and Catalysts: Current Status and Future Opportunities. *ChemSusChem*, 13(12), 3079–3100.
- Golmohammadzadeh, R., Rashchi, F., and Vahidi, E. 2017. Recovery of Lithium and Cobalt from Spent Lithium-Ion Batteries Using Organic Acids: Process Optimization and Kinetic Aspects, *Waste Management*, 64, 244–254.
- Huang, K., Inoue, K., Harada, H., Kawakita, H., and Ohto, K. 2011. Leaching of Heavy Metals by Citric Acid from Fly Ash Generated in Municipal Waste Incineration Plants. *J Mater Cycles Waste Manag*, 13, 118–126.
- Istiqomah, W. F., Ariffianto, Prasetya, A., Bendiyana, I.M., dan Petrus, H.T.B.M. 2019. Kinetika Leaching Platinum dari Spent Katalis Menggunakan Aqua Regia. *Prosiding Seminar Nasional Energi dan Teknologi (SINERGI)*, 4: 93–100.
- Kotsakis, N., Raptopoulou, C. P., Tangoulis, V., Terzis, A., Giapintzakis, J., Jakusch, T., Kiss, T., and Salifoglou, A. 2003. Correlations of Synthetic, Spectroscopic, Structural, and Speciation Studies in the Biologically Relevant Cobalt(II)-Citrate System: The Tale of the First Aqueous Dinuclear Cobalt(II)-Citrate Complex. *Inorganic Chemistry*, 42(1), 22–31.
- Kurniawan, R., Fairus, S., Liliandini, T., and Febrian, M. 2010. Separation of Metals from Spent Catalysts Waste by Bioleaching Process. *Jurnal Teknik Kimia*, 4(2): 295–303.
- Lai, Y. C., Lee, W. J., Huang, K. L., and Wu, C. M. 2008. Metal Recovery from Spent Hydrodesulfurization Catalysts Using A Combined Acid-Leaching and Electrolysis Process. *Journal Hazardous Material*, 154: 588–594.
- Lambros, M., Tran, T. H., Fei, Q., and Nicolaou, M. 2022. Review Citric Acid: A Multifunctional Pharmaceutical Excipient. *Pharmaceutics*, 14(5), 972.

- Lee, C., Arby, D. S., Kim, C., Lim, J., Kwon, K., and Chung, E. 2025. Hydrometallurgical Process of Spent Lithium-Ion Battery Recycling Part. 1 Chemical Leaching of Valuable Metals from Cathode Active Materials: Review and Case Study. *Hydrometallurgy*, 235.
- Lestari, R. R. 2018. *Optimasi Ultrasonic-Assisted Extraction (UAE) Daun Bandotan (Ageratum conyzoides) Menggunakan Desain Faktorial dengan Parameter Kadar Flavonoid Total dan Aktivitas Antioksidan*. Universitas Sriwijaya. Palembang.
- Li, L., Zhai, L., Zhang, X., Lu, J., Chen, R., Wu, F., and Amine, K. 2014. Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries by Ultrasonic-Assisted Leaching Process. *Journal of Power Sources*, 262, 380–385.
- Li, M., Wang, Q., Guo, W., Zhao, X., Zhang, Y., Zhou, X., Lei, Z., and Zhang Y. 2025. Selective Complexation and Leaching of Cobalt Using Histidine in An Alkaline Medium. *Processes*, 13(4), 1039.
- Lison, D. 2015. *Handbook on the Toxicology of Metals*. Elsevier B.V. London.
- Luo, H., Peng, J., Zheng, L., Ju, S., and Li, H. 2015. Kinetics of Atmospheric Leaching of Low-Grade Zinc Oxide Ore with Sulfuric Acid. *Hydrometallurgy*, 151, 143–151.
- Marafi, M. and Rana, M. S. 2016. Refinery Waste: The Spent Hydroprocessing Catalyst and Its Recycling Options. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 202: 219-230.
- Marafi, M. and Stanislaus, A. 2008. Options and Process for Spent Catalyst Handling and Utilization. *Journal Hazardous Material*, B101: 123–132.
- Matzapetakis, M., Dakanali, M., Raptopoulou, C. P., Tangoulis, V., Terzis, A., Moon, N., Giapintzakis, J., and Salifoglou, A. 2000. Synthesis, Spectroscopic, and Structural Characterization of the First Aqueous Cobalt(II)-Citrate Complex: Toward A Potentially Bioavailable Form of Cobalt in Biologically Relevant Fluids. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 5(4), 469–474
- Mohammed, W.T., Ahmedzeki, N.S., and Nabi, M.F.A. 2011. Extraction of Valuable Metals from Spent Hydrodesulfurization Catalyst by Two Stage Leaching Method. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 12(4): 21–35.

- Muharrom, M. I. 2018. *Tugas Akhir : Analisis Pengaruh Variasi Larutan Asam (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) Terhadap Proses Ekstraksi Lithium pada Lumpur Sidoarjo Menggunakan Metode Hidrometalurgi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Musta, R. 2011. Hidrodesulfurisasi Tiofen Menggunakan Katalis CoMo/H-Zeolit Y. *Jurnal Fisika FLUX*, 8(1), 1–6.
- Nadeak, V. I. Z., Suratman, dan Oediyani, S. 2017. Karakterisasi Pelindian Produk Pemanggangan Alkali (Frit) dalam Media Air dan Asam Sulfat. *Jurnal Furnace*, 3(1): 1–6.
- Nugroho, M. E. C., Sutijan, Prasetya, A., and Astuti, W. 2021. Recovery of Cobalt and Molybdenum from Spent Catalyst Using Citric Acid. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 882, 1-7.
- Pinto, I. S. S and Soares, H. M. V. M. 2012. Selective Leaching of Molybdenum from Spent Hydrodesulphurisation Catalysts Using Ultrasound and Microwave Methods. *Hydrometallurgy*. 129-130: 19–25.
- Prasetyo, D., Sanwani, E., Mayangsari, W., Suryadi, and Fathan. 2022. Leaching Recovery of Cobalt and Lithium from Spent Lithium-Ion Batteries Using Citric Acid and Hydrogen Peroxide. *Jurnal Material dan Proses Metalurgi*, 3(1), 31–39.
- Qiao, D., Dai, T., Wang, G., Ma, Y., Fan, H., Gao, T., and Wen, B. 2022. Exploring Potential Opportunities for the Efficient Development of the Cobalt Industry in China by Quantitatively Tracking Cobalt Flows During The Entire Life Cycle from 2000 to 2021. *Journal of Environmental Management*, 318(24).
- Rezki, A. S. R., Sumardi, S., Astuti, W., Bendiyasa, I. M., and Petrus, H. T. B. M. 2021. Molybdenum Extraction from Spent Catalyst Using Citric Acid: Characteristic and Kinetics Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 830.
- Oza, R and Patel, S. 2011. Recovery of Nickel from Spent Ni/Al₂O₃ Catalysts Using Acid Leaching, Chelation and Ultrasonication. *Research Journal of Recent Sciences*, 1, 434–443.
- Saeki, R., and Ohgai, T. 2020. Perpendicular Magnetization Performance of Hcp-Cobalt Nanocylinder Array Films Electrodeposited from An Aqueous Solution Containing Cobalt(II)-Citrate Complexes. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8029–8040.

- Safari, V., Arzpeyma, G., Rashchi, F., and Mostoufi, N. 2009. A Shrinking Particle–Shrinking Core Model for Leaching of A Zinc Ore Containing Silica. *International Journal of Mineral Processing*, 93(1), 79–83.
- Salisova, M., Toma, S., and Mason, T. J. 1997. Comparison of Conventional and Ultrasonically Assisted Extractions of Pharmaceutically Active Compounds from *Salvia Officinalis*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 4(2), 131–134.
- Sari, D. P., Tawfiequrahman, A., Petrus, H. T. B. M., Mufakir, F. R., Astuti, W., Iskandar, Y., and Bratakusuma, D. 2018. Valuable Metals Extraction from Hydrocracking Spent Catalyst Using Citric Acid. *Prosiding Seminar Jurusan Teknik Kimia UPN Veteran*. Yogyakarta.
- Setiabudi, A., Hardian, R., dan Muzakir, A. 2012. *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. UPI Press. Bandung.
- Shen, W., Li, T., and Junfeng, C. 2012. Recovery of Hazardous Metals from Spent Refinery Processing Solid Catalyst. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 253–256.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., and Crouch, S. R. 2018. *Principles of Instrumental Analysis (7th ed.)*. Cengage Learning. Boston.
- Sugito dan Marliyana, S. D. 2021. *Uji Performa Spektrofotometer Serapan Atom Thermo Ice 3000 Terhadap Logam Pb Menggunakan CRM 500 dan CRM 697 di UPT Laboratorium Terpadu UNS*. UNS. Surakarta.
- Sugito dan Setiawan, A. K. R. 2022. Performa AAS Thermo Ice 3000 Terhadap Logam Cu Menggunakan CRM 500 dan CRM 697 di UPT Laboratorium Terpadu UNS. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 4(1), 1–6.
- Szymanska, A., Cieszynska-Semenowicz, M., Olkowska, E., and Wolska, L. 2019. Validation of a Method for the Determination of Selected Metals in Atmospheric Precipitation Samples by Spectrometric Techniques. *Analytical Letters*, 52(15), 2371–23F88.
- Vieceli, N., Al-Muntaseri, N., Samuelson, C., and Ye, G. 2023. Hydrometallurgical Recovery of Lithium and Cobalt from Spent Li-Ion Batteries Using Citric Acid: Characterization and Leaching Optimization. *MDPI Resources*, 12(3), 40.

- Wanta, K. C., Putra, F. D., Susanti, R. F., Gemilar, G. P., Astuti, W., Virhdian, S., dan Petrus, H. T. B. M. 2019. Pengaruh Derajat Keasaman (pH) dalam Proses Presipitasi Hidroksida Selektif Ion Logam dari Larutan Ekstrak Spent Catalyst. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(2), 94–105.
- Wiecka, Z., Rzelewska-Piekut, M., Cierpiszewski, R., Staszak, K., and RegelRosocka, M. 2020. Hydrometallurgical Recovery of Cobalt(II) from Spent Industrial Catalysts. *Catalyst*, 10(1), 61.
- Xu, M., Kang, S., Jiang, F., Yan, X., Zhu, Z., Zhao, Q., Teng, X., and Wang, Y. 2021. A Process of Leaching Recovery for Cobalt and Lithium from Spent Lithium-Ion Batteries by Citric Acid and Salicylic Acid. *RSC Advances*, 11(44), 27689–27700.
- Yan, Y., Gao, J., Wu, J., and Li, B. 2014. *Effects of Inorganic and Organic Acids on Heavy Metals Leaching in Contaminated Sediment*. China University of Mining and Technology Press. China.