

**STUDI PENAMBAHAN CAMPURAN ASAP CAIR CANGKANG KELAPA
SAWIT DAN EKSTRAK DAUN ALPUKAT SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM SULFAT (CaSO_4)**

(Skripsi)

Oleh

**AINUN FARIHAH
NPM 2117011066**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

STUDI PENAMBAHAN CAMPURAN ASAP CAIR CANGKANG KELAPA SAWIT DAN EKSTRAK DAUN ALPUKAT SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIUM SULFAT (CaSO_4)

Oleh

Ainun Faridah

Pembentukan kerak kalsium sulfat dalam pipa menyebabkan hambatan aliran fluida dan menjadi faktor kerugian. Oleh karena itu, dalam mengatasi permasalahan tersebut penelitian ini dilakukan dengan menguji efektivitas inhibitor kerak yang berasal dari campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dengan menggunakan metode penambahan bibit kristal (*seeded experiment*) pada konsentrasi larutan pertumbuhan CaSO_4 yang digunakan yaitu 0,025; 0,038; 0,050; dan 0,063 M serta variasi konsentrasi inhibitor 5:1; 5:3; 5:5; dan 5:7.

Efektivitas tertinggi terjadi pada konsentrasi larutan pertumbuhan kristal CaSO_4 0,025 M dan konsentrasi inhibitor yang ditambahkan 5:7 dengan presentase efektivitas sebesar 83,19%. Berdasarkan analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa kristal CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor berukuran besar, tidak berlapis, padat, tajam, yang terdiri dari fasa gipsum dan basanit, sedangkan dengan penambahan inhibitor kristal CaSO_4 memiliki fasa baru berukuran kecil, pendek, dan berserabut yaitu fasa anhidrit. Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan terjadi penurunan ukuran partikel kerak CaSO_4 berdasarkan nilai rata-rata (*mean*) dan nilai tengah (*median*) setelah adanya penambahan inhibitor.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dapat digunakan sebagai penghambat pertumbuhan kerak CaSO_4 .

Kata kunci: Asap cair cangkang kelapa sawit, ekstrak daun alpukat, inhibitor, CaSO_4 , kerak

ABSTRACT

STUDY ON THE ADDITION OF A MIXTURE OF PALM SHELL LIQUID SMOKE AND AVOCADO LEAF EXTRACT AS AN INHIBITOR OF CALCIUM SULFATE (CaSO₄) SCALE

By

Ainun Farihah

Formation of calcium sulfate (CaSO₄) scale in pipes causes fluid flow resistance and leads to losses. Therefore, to address this issue, this study was conducted to evaluate the effectiveness of a scale inhibitor derived from a mixture of palm shell liquid smoke and avocado leaf extract using the seeded experiment method. The calcium sulfate growth solution concentrations used were 0.025; 0.038; 0.050; and 0.063 M, with inhibitor concentration variations of 5:1; 5:3; 5:5; and 5:7. The highest effectiveness was observed at a crystal growth solution concentration of 0.025 M and an inhibitor concentration of 5:7, achieving an effectiveness percentage of 83.19%. Analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) indicated that CaSO₄ crystals without the inhibitor were large, non-layered, dense, and sharp, consisting of gypsum and bassanite phases. In contrast, the CaSO₄ crystals with the inhibitor formed a new phase that was small, short, fibrous, and non-layered, identified as the anhydrite phase. Furthermore, Particle Size Analyzer (PSA) analysis revealed a reduction in CaSO₄ scale particle size based on both the mean and median values after inhibitor addition. Thus, it can be concluded that the inhibitor derived from a mixture of palm shell liquid smoke and avocado leaf extract can effectively inhibit CaSO₄ scale formation.

Keywords: Palm shell liquid smoke, avocado leaf extract, inhibitor, CaSO₄, scale formation

**STUDI PENAMBAHAN CAMPURAN ASAP CAIR CANGKANG KELAPA
SAWIT DAN EKSTRAK DAUN ALPUKAT SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM SULFAT (CaSO_4)**

Oleh

AINUN FARIHAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **STUDI PENAMBAHAN CAMPURAN
ASAP CAIR CANGKANG KELAPA
SAWIT DAN EKSTRAK DAUN
ALPUKAT SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIMUM SULFAT (CaSO_4)**

Nama Mahasiswa : **Ainun Farihah**

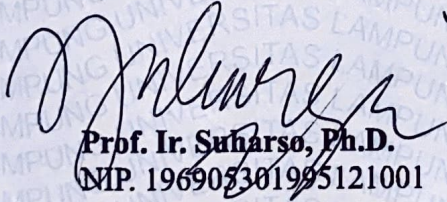
Nomor Pokok Mahasiswa : **2117011066**

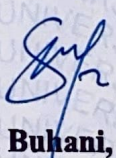
Program Studi : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

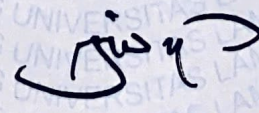


1. **Komisi Pembimbing**


Prof. Ir. Suharso, Ph.D.
NIP. 196905301995121001


Prof. Dr. Buhani, M.Si.
NIP. 196904161994032003

2. **Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kerja Sama
FMIPA Universitas Lampung**

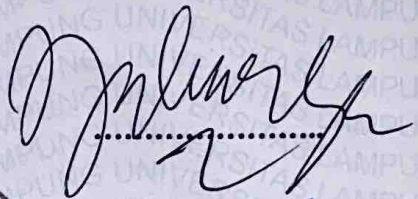

Mulyono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197406112000031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Ir. Suharso, Ph.D.



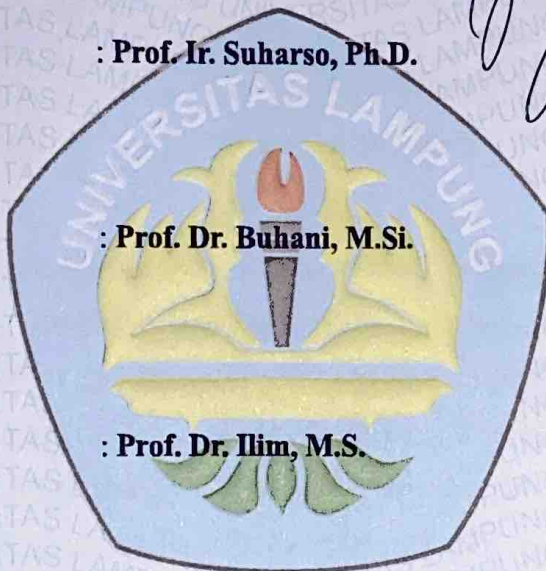
Sekretaris

: Prof. Dr. Buhani, M.Si.



Anggota

: Prof. Dr. Ilim, M.S.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini.

Nama : Ainun Farihah
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011066
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul "**Studi Penambahan Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4)**" adalah benar karya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Saya tidak keberatan jika data dalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, Juni 2025

Yang Menyatakan



Ainun Farihah
NPM. 2117011066

RIWAYAT HIDUP



Penulis dengan nama lengkap Ainun Fariyah dilahirkan di Tulang Bawang, 14 April 2003 yang merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Kahfi dan Ibu Juwariyah. Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Dharma Wanita Bumi Dipasena Mulya pada Tahun 2009 dan menyelesaikan Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 1 Bumi Dipasena Mulya pada Tahun 2015, kemudian menyelesaikan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Rawajitu Timur pada Tahun 2018, selanjutnya penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Al-Kautsar Bandar Lampung pada Tahun 2021, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada Tahun 2021.

Selama menjadi mahasiswa kimia, penulis banyak mendapatkan pengalaman baru seperti aktif menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) Biro Usaha Mandiri (BUM) periode 2021. Pada tahun 2022, penulis telah mengikuti kegiatan sosial menjadi *volunteer* dalam salah satu kegiatan Ikatan Himpunan Mahasiswa Kimia Indonesia (IKAHIMKI) Wilayah 1 dan berkolaborasi dengan mahasiswa Kimia Institut Teknologi Sumatera (ITERA) dan mahasiswa Pendidikan Kimia Universitas Lampung. Pada tahun 2023, penulis pernah mengikuti kegiatan Program Kompetisi Kampus Merdeka (PKKM) yang diselenggarakan oleh Universitas Lampung yaitu berkegiatan magang di Dinas Lingkungan Hidup Kota khususnya pada bidang analisis kualitas lingkungan. Pada tahun 2024, penulis

telah mengikuti beberapa kegiatan seperti menjadi asisten praktikum Kimia Dasar, Kimia Anorganik I, dan Kimia Anorganik II. Pada tahun yang sama, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Gebang Kabupaten Pesawaran selama 38 hari pada bulan Januari-Februari 2024.

Pada tahun 2024 penulis memulai penelitian tugas akhir di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik FMIPA Universitas Lampung dengan judul skripsi “Studi Penambahan Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4)” dan telah menyelesaikannya pada Tahun 2025.

MOTTO

“Sungguh ini semua kehendak Allah. Tidak ada kekuatan apa pun kecuali dengan
[pertolongan] Allah”
(QS. Al-Kahfi : 39)

“Sesungguhnya urusan-Nya apabila Dia menghendaki sesuatu Dia hanya berkata
kepadanya, “Jadilah! Maka jadilah sesuatu itu.”
(QS. Yasin : 82)

*“Never complain, never explain, and what it means is don’t complain about life,
don’t explain what you’re doing or why you doing. Just do it and let your action
speak for themselves”*
(Robert Greene)

*“When life was started to getting harder sometimes, at least i have my family in
my life”*

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan Alhamdulillah rabbil'alamin segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya kepadaku, serta shalawat serta salam yang selalu kuhaturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa keindahan dan kenikmatan agama islam. Kupersembahkan sebuah karya ilmiah ini kepada :

Terkasih, kedua orang tuaku, Papah dan Mamah yang tidak pernah berhenti mengorbankan segala yang mereka punya dari pagi yang terang menuju malam yang gelap, atas dukungan, doa, nasihat, bimbingan, motivasi, dan kehangatan dalam mendukung semua keinginanku, serta kakak-kakakku, keponakanku, dan seluruh keluarga yang selalu memberikan keharmonisan dan semangat kepadaku.

Dengan rasa penuh hormat, terima kasih Bapak Prof. Suharso, Ph.D., Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., Ibu Prof. Dr. Ilim, M.S., dan Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si., serta seluruh dosen dan civitas akademika Jurusan Kimia yang telah membimbing serta memberikan ilmu yang sangat bermanfaat kepadaku sehingga aku dapat menyelesaikan masa kuliahku kurang lebih empat tahun ini.

Tersayang, sahabat dan teman-temanku yang selalu menemaniku di setiap keadaan, memberikan tawa, kebahagiaan, kebersamaan, dan pelajaran hidup yang sangat berharga dalam bagian hidupku. Terima kasih sudah berjuang bersama-sama untuk menyelesaikan masa perkuliahan ini.

Dan almamater tercinta, Universitas Lampung.

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT yang senantiasa telah memberikan rahmat, nikmat, hidayah, karunia, dan ridha-Nya yang tiada tara kepada penulis. Shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa seluruh umat dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang benderang, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul:

“Studi Penambahan Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4)”

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Dalam proses pembuatan skripsi ini, penulis memiliki banyak hambatan, baik dari luar maupun dari dalam diri penulis sendiri. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan dan doa dari berbagai pihak, oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah melimpahkan kuasa, rahmat, nikmat, hidayah, serta ridha-Nya atas doa-doa yang penulis haturkan sepanjang hidup penulis didengar dan dikabulkan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu.
2. Teristimewa kedua orang tua penulis, cinta pertama penulis Papah Kahfi dan pintu surga penulis Mamah Juwariyah. Terima kasih atas segala pengorbanan waktu, tenaga, pikiran yang tiada henti, cinta kasih tulus yang tak pernah berkurang, kesabaran yang luas tiada batas, do'a, dukungan, bimbingan, nasihat, motivasi di setiap hari penulis yang menjadi kekuatan dalam menghadapi permasalahan yang penulis alami. Terima kasih telah melahirkan

penulis dan menjadikan keberuntungan terbesar bisa menjadi bagian dari hidup kalian. Terima kasih untuk selalu berada di sisi penulis dalam hari-hari yang pahit dan gelap. Alhamdulillah kini anak bungsu papah dan mamah telah menyelesaikan skripsi ini sebagai perwujudan dan apresiasi kerja keras papah dan mamah yang tak kenal lelah.

3. Kedua cinta kasih kakakku, Kakak Ely Stiawati dan Minak Muhammad Wahfi Udin Ma'ruf. Terima kasih telah menjadi bagian perjalanan penulis sejak kecil, terima kasih telah menemani penulis dalam suka maupun duka, memberikan semangat, dukungan, bimbingan di setiap harinya, dan selalu ada dalam kondisi apapun. Terima kasih telah mendengar, memeluk, dan merangkul di setiap tangisan penulis dan kasih sayang yang tak pernah berhenti sedari bayi.
4. Abang Sepri Jumianto, mbak Salwa Nur Salsabila yang telah memberikan doa, dukungan, semangat yang tidak pernah putus di setiap harinya.
5. Kedua keponakan penulis, Abang Hisyam dan Adik Hanan yang selalu ceria dan membuat penulis tertawa di setiap harinya. Terima kasih telah menyambut penulis dengan hangat dan canda tawa setiap harinya di depan pintu rumah kita.
6. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D., selaku dosen pembimbing I penulis, terima kasih atas segala bimbingan, masukan, nasihat, saran, keikhlasan, kemudahan, dan kesabaran dalam membimbing penulis saat menyelesaikan skripsi. Semoga Allah SWT membalas kebaikan Bapak dan diberikan segala sesuatu yang terbaik kepada bapak.
7. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing II penulis, terima kasih ibu atas segala arahan, nasihat, saran, bimbingan, dan pelajaran kehidupan yang berharga kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga Allah SWT membalas kebaikan ibu baik di dunia maupun di akhirat.
8. Ibu Prof. Dr. Ilim, M.S., selaku dosen pembahas penulis, terima kasih ibu atas saran-saran yang telah diberikan, nasihat, ilmu, masukan, dan bimbingan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan baik. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan ibu baik di dunia maupun di akhirat.

9. Ibu Dr. Yuli Ambarwati, M.Si., Dr., S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing akademik penulis. Terima kasih ibu atas waktu dan doa, serta bimbingan yang telah ibu berikan. Semoga ibu mendapatkkan balasan yang terbaik dari Allah SWT.
10. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
11. Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
12. Seluruh dosen dan civitas akademika Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung atas segala ilmu, pengalaman, motivasi, dan nasihat selama perkuliahan penulis.
13. Roy Rafles Matorang Pasaribu. Abang Roy, terima kasih sudah menemani proses perjalanan panjang penulis sebelum dan setelah penyusunan skripsi. Terima kasih atas waktu, dukungan, semangat, doa, dan sebagai tempat untuk penulis bercerita di setiap harinya, serta selamat atas gelar barunya yang telah kita raih bersama.
14. Teman sekaligus keluarga dalam masa perkuliahan penulis, Zuan, Fera, Nanda, Rachel, Mayang, dan Nurul yaitu Bolby. Terima kasih telah kebersamai di masa perkuliahan sejak menjadi mahasiswa baru, terima kasih telah bersedia menjadi sahabat penulis yang bersedia merangkul di setiap langkah penulis.
15. Teman sedari SMP yang setia sampai saat ini, Salsa, Rachel, Indah, Abi, dan Ridho. Terima kasih telah kebersamai penulis dari masa putih biru sampai saat ini.
16. Teman tim penelitian penulis, Zuan, Rachel, Jojo, dan Nadira. Terima kasih sudah bersama-sama berjuang dan menyelesaikan penelitian ini sampai matahari terbenam.
17. Rekan-rekan angkatan 2021 serta pihak lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.
18. Terakhir, kepada Ainun Fariyah yaitu diriku sendiri. Terima kasih sudah bertahan melewati banyaknya pasang surut kehidupan. Terima kasih sudah bertanggung jawab dan berhasil menyelesaikan perkuliahan yang telah

dimulai dari 2021 lalu dengan tepat waktu. Tetaplah selalu berusaha dan berdoa di setiap keadaan karena ini adalah awal bukan akhir.

Bandar Lampung, Juni 2025

Penulis,

Ainun Farihah

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Kerak.....	5
2.2. Faktor Pembentuk Kerak	6
2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak	9
2.4. Kalsium Sulfat (CaSO ₄).....	12
2.5. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak.....	14
2.6. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit.....	17
2.7. Ekstrak Daun Alpukat (<i>Persea americana miller</i>).....	20
2.8. Metode <i>Seeded Experiment</i>	21
2.9. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat (CaSO ₄)	21
2.9.1. Spektrofotometer <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	22
2.9.2. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	23
2.9.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	24
2.9.4. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	25
2.9.5. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	26
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
3.2. Alat dan Bahan.....	28
3.3. Prosedur Penelitian	29
3.3.1. Preparasi Inhibitor	29
3.3.2. Preparasi Bibit Kristal	32
3.3.3. Pengujian Asap Cair sebagai Inhibitor dalam Pertumbuhan Kristal CaSO ₄	32
3.3.4. Analisa Data	34

3.3.5. Diagram Alir.....	35
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1. Pembuatan Inhibitor Campuran Ekstrak Daun Alpukat dan Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit.....	37
4.2. Uji Ketahanan Larutan Inhibitor Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat	38
4.3. Perbandingan Larutan Pertumbuhan Kalsium Sulfat (CaSO_4)	39
4.4. Analisis Gugus Fungsi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Menggunakan Spektrofotometer Infra Merah (IR)	41
4.5. Analisis Komponen Senyawa Kimia Pada Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i> (GC-MS).....	44
4.6. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 Tanpa Penambahan Inhibitor pada Beberapa Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Seeded Experiment</i>	48
4.7. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Penambahan Inhibitor dengan Metode <i>Seeded Experiment</i>	49
4.7.1. Inhibitor Ekstrak Daun Alpukat	50
4.7.2. Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	54
4.7.3. Penentuan Efektivitas Campuran Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat	57
4.7.4. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,025 M	60
4.7.5. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,038 M	62
4.7.6. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,050 M	63
4.7.7. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,063 M	65
4.8. Analisis Permukaan Kerak CaSO_4 Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	68
4.9. Analisis Struktur Kerak CaSO_4 dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	70
4.10. Analisis Distribusi Ukuran Partikel Kerak CaSO_4 Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	73
SIMPULAN DAN SARAN.....	76
5.1. Simpulan.....	76
5.2. Saran.....	77

DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN	83

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsi	23
2. Perbandingan konsentrasi campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat	31
3. Gugus fungsi ekstrak daun alpukat	43
4. Gugus fungsi asap cair cangkang kelapa sawit	43
5. Komponen kimia asap cair cangkang kelapa sawit.....	45
6. Komponen kimia asap cair cangkang kelapa sawit pada penelitian ini	46
7. Komponen kimia ekstrak daun alpukat.....	47
8. Nilai pH campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat	50
9. Nilai pH ekstrak daun alpukat dengan variasi konsentrasi	50
10. Nilai pH larutan pertumbuhan sebelum dan sesudah penambahan inhibitor ekstrak daun alpukat.....	51
11. Data presentase efektivitas larutan pertumbuhan sebelum dan sesudah penambahan inhibitor ekstrak daun alpukat	53
12. Nilai pH asap cair cangkang kelapa sawit dengan variasi konsentrasi	54
13. Nilai pH larutan pertumbuhan sebelum dan sesudah penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit.....	54
14. Data presentase efektivitas inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit pada variasi konsentrasi	56
15. Nilai pH larutan pertumbuhan sebelum dan setelah penambahan inhibitor campuran AD (5:7).....	57
16. Data presentase efektivitas inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat pada variasi konsentrasi	60

17. Data persentase efektivitas inhibitor campuran AD pada larutan pertumbuhan CaSO ₄ 0,025 M.....	61
18. Data persentase efektivitas inhibitor campuran AD pada larutan pertumbuhan CaSO ₄ 0,038 M.....	63
19. Data persentase efektivitas inhibitor campuran AD pada larutan pertumbuhan CaSO ₄ 0,050 M.....	64
20. Data persentase efektivitas inhibitor campuran AD pada larutan pertumbuhan CaSO ₄ 0,063 M.....	66
21. Data persentase efektivitas inhibitor pada penambahan inhibitor 5:7	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Endapan kerak pada pipa	6
2. Diagram temperatur-konsentrasi	9
3. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air	12
4. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ($\diamond$ = bibit kristal, $\circ$ = inhibitor)	17
5. Tanaman Alpukat (<i>Persea americana</i> Mill.)	20
6. Morfologi kerak CaSO_4 (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm.....	25
7. Distribusi ukuran partikel CaSO_4	26
8. Pola XRD kristal CaSO_4	27
9. Diagram Alir Penelitian.....	36
10. Reaktor pirolisis (a); Temperatur reaktor saat proses pembakaran (b); dan asap cair cangkang kelapa sawit (c)	38
11. Perubahan ekstrak daun alpukat (a) tanpa penambahan asap cair cangkang kelapa sawit selama 2 minggu dan (b) dengan penambahan asap cair cangkang kelapa sawit setelah didiamkan selama 1 bulan	39
12. Perbandingan larutan pertumbuhan kerak CaSO_4 0,025 M (a) tanpa penambahan inhibitor, (b) dengan penambahan inhibitor komersial, (c) dengan penambahan inhibitor ekstrak daun alpukat 350 ppm, (d) dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 250 ppm, dan (e) dengan penambahan inhibitor campuran AD (5:7)	40
13. Perbandingan kerak CaSO_4 (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor campuran AD (5:7)	41

14. Spektrum IR ekstrak daun alpukat (a) dan asap cair cangkang kelapa sawit (b)	42
15. Kromatogram asap cair cangkang kelapa sawit	44
16. Kromatogram ekstrak daun alpukat	44
17. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO_4 tanpa inhibitor	49
18. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO_4 dengan penambahan inhibitor ekstrak daun alpukat (a) 0,025, (b) 0,038, dan (c) 0,050 M	52
19. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO_4 dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit (a) 0,025, (b) 0,038, dan (c) 0,050 M	55
20. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO_4 dengan penambahan variasi konsentrasi inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat (a) 0,025, (b) 0,038, (c) 0,050 M, dan (d) 0,063 M	58
21. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO_4 0,025 M dengan konsentrasi inhibitor 5:1, 5:3, 5:5, dan 5:7	61
22. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO_4 0,038 M dengan konsentrasi inhibitor 5:1, 5:3, 5:5, dan 5:7	62
23. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO_4 0,050 M dengan konsentrasi inhibitor 5:1, 5:3, 5:5, dan 5:7	64
24. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO_4 0,063 M dengan konsentrasi inhibitor 5:1, 5:3, 5:5, dan 5:7	65
25. Morfologi kerak CaSO_4 pada konsentrasi 0,025 M dengan perbesaran 2500x tanpa penambahan inhibitor (a) dan dengan penambahan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat (5:7) (b)	68
26. Morfologi kerak CaSO_4 pada konsentrasi 0,025 M dengan perbesaran 5000x tanpa penambahan inhibitor (a) dan dengan penambahan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat (5:7) (b)	69
27. Pola XRD kerak CaSO_4 (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor AD 5:7 (G: Gypsum, B: Basanit, dan A: Anhidrit).	71
28. Distribusi ukuran partikel kerak CaSO_4 0,025 M tanpa inhibitor dan dengan penambahan inhibitor campuran AD (5:7)	73
29. Mekanisme penghambatan kerak CaSO_4 oleh inhibitor campuran AD	75

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri merupakan kegiatan pengolahan suatu bahan baku yang digunakan sehari-hari oleh manusia dengan menggunakan peralatan industri. Salah satu peralatan industri adalah pipa-pipa industri terutama pada bidang industri minyak dan gas sebagai aliran fluida. Pipa industri sebagai aliran fluida dalam pengoperasiannya dapat menimbulkan permasalahan yang menyebabkan kerugian, yaitu terjadi pada dinding-dinding permukaan pipa yang transfer panas dan permukaan evaporasi yang menyebabkan terjadinya penumpukan kerak pada pipa industri. Penumpukan kerak pipa industri menyebabkan kurangnya efektivitas kerja dan mempersempit proses aliran fluida pada pipa dikarenakan diameter pipa yang berkurang. Terhambatnya aliran fluida menyebabkan kenaikan suhu dan tekanan yang menyebabkan kemungkinan pipa akan rusak bahkan pecah. Salah satu industri minyak di Indonesia yang mengalami kerugian sebesar 6-7 dolar untuk mengganti pipa pada bagian geothermal setiap 10 tahun yang disebabkan oleh permasalahan kerak pada pipa (Suharso *et al.*, 2017).

Kerak adalah tumpukan keras bahan-bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air. Pengerakan didefinisikan sebagai proses alami yang terjadi yang disebabkan oleh adanya reaksi kimia antara kandungan-kandungan yang tidak dikehendaki yang terdapat dalam air. Kandungan atau unsur yang menyebabkan pengendapan yaitu seperti alkalin, kalsium, klorida, dan sulfat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan yang setimbang. Dalam keadaan konsentrasi yang melebihi kelarutan dalam air pada unsur tersebut, kerak akan menempel dan

menetap pada permukaan pipa. Pertumbuhan kerak pada dasarnya disebabkan oleh pengkristalan yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi larutan lewat jenuh, laju alir, temperatur, kehadiran pengotor, dan zat adifit (Dera, 2018).

Kerak yang terbentuk pada aliran fluida dalam proses industri dapat menghambat kinerja dan menyebabkan kerugian besar, maka diperlukan penghambatan pertumbuhan kerak pada pipa. Penghambatan pertumbuhan kerak dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti pengendalian pH, pelunakan, dan pembebasan mineral air padatan. Metode pengendalian pH larutan biasanya menggunakan metode asam dengan konsentrasi tinggi, tetapi metode tersebut kurang efektif karena dalam penggunaan asam dengan konsentrasi yang tinggi memiliki resiko yang tinggi dan dapat menyebabkan korosi yang serius pada instalasi (Raharjo, 2020). Pada metode pelunakan dan pembebasan mineral air padatan membutuhkan biaya pengoperasian yang cukup tinggi karena memerlukan penyediaan air bebas mineral. Berdasarkan pada kelemahan yang ada pada beberapa metode tersebut, saat ini berkembang suatu metode yang efektif dalam penyelesaian permasalahan kerak, yaitu menggunakan metode inhibitor kerak.

Inhibitor merupakan senyawa kimia saat ditambahkan dalam lingkungan dalam jumlah yang sedikit dapat menghambat suatu laju reaksi kimia. Salah satu inhibitor yang digunakan yaitu inhibitor kerak yang berfungsi mengurangi pertumbuhan kerak. Penambahan inhibitor pada kerak digunakan untuk menurunkan kadar pH larutan, mengontrol komposisi morfologi dan fasa kristal pada kerak. Inhibitor kerak dipilih berdasarkan jenisnya yang efektif dalam penurunan kadar kerak pada pipa, seperti pada kestabilan, kecocokan, dan biaya yang dikeluarkan dalam penghambatan pertumbuhan jenis kerak. Berdasarkan sifatnya, inhibitor kerak yang sangat diharapkan oleh peneliti yaitu dapat stabil dalam air pada waktu yang panjang dan temperatur yang tinggi saat digunakan.

Inhibitor kerak yang umumnya digunakan yaitu inhibitor kerak anorganik, dan yang biasa digunakan adalah HCl, H₂SO₄, asam asetat atau campuran HCl dan CuSO₄ (Raharjo, 2020). Dalam beberapa tahun terakhir, adanya perkembangan dalam penanganan kerak dengan menggunakan bahan-bahan yang bersifat terbarukan, ekonomis, dan ramah lingkungan. Berdasarkan penelitian

sebelumnya, penambahan inhibitor dalam menangani pertumbuhan kerak menggunakan tanaman di sekitar, seperti ekstrak kulit manggis (*Garcinia mangostana L.*) (Suharso *et al.*, 2022), ekstrak kemenyan (*Styrax Benzoid Dryand*) (Suharso *et al.*, 2017), ekstrak daun gambir (*Uncaria gambir*) (Suharso *et al.*, 2010), dan asap cair tempurung kelapa (Suharso *et al.*, 2019).

Pada penelitian ini, digunakan inhibitor yang berasal dari campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat. Cangkang kelapa sawit yang menjadi limbah industri CPO (*Crude Palm Oil*) dapat digunakan dalam bahan baku arang namun belum digunakan secara maksimal karena limbah cangkang kelapa sawit sukar terdekomposisi secara alami (Haji, 2013). Salah satu teknologi alternatif yang dapat menangani permasalahan tersebut yaitu dengan metode pirolisis. Cangkang kelapa sawit dalam metode pirolisis menghasilkan asap cair yang dapat digunakan sebagai inhibitor untuk menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat (CaSO_4). Asap cair memiliki kandungan fenolik yang tinggi, asam-asam organik seperti aditif karboksilat, dan karbonil (Sari dkk., 2018). Komponen penyusun asap cair cangkang kelapa sawit yaitu meliputi senyawa fenol, karbonil, dan asam karboksilat serta senyawa lainnya yang bersifat asam.

Daun alpukat merupakan bagian tanaman alpukat yang banyak ditemukan di daerah beriklim tropis dan dimanfaatkan menjadi bahan obat-obatan herbal seperti anti kolesterol sesuai dengan penelitian (Muqowwiyah dan Ratna, 2021), namun banyaknya daun alpukat yang tidak digunakan karena perawatan tanaman alpukat seperti pemangkasan ranting. Permasalahan limbah daun alpukat dapat diatasi dengan dijadikan salah satu inhibitor penghambat pertumbuhan kerak dikarenakan mengandung senyawa flavonoid, tanin, saponin, dan steroid. Pada penelitian Azzahra dkk., (2019), kadar tanin pada daun alpukat yaitu 22,07% dan menjadi salah satu komponen penghambat pertumbuhan kerak. Berdasarkan komponen senyawa kimia yang berada pada asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstraksi daun alpukat, maka kedua inhibitor ramah lingkungan tersebut dipadukan dengan harapan dapat menghasilkan komponen penghambat pertumbuhan kerak CaSO_4 yang berkualitas dan memiliki efektivitas kerja yang tinggi. Perpaduan inhibitor kerak yang digunakan pada penelitian ini merupakan salah satu *green* inhibitor yang ramah lingkungan, mudah ditemukan, dan memiliki harga terjangkau.

Pada penelitian ini digunakan metode *seeded experiment* pada pertumbuhan kerak kalsium sulfat (CaSO_4). Selanjutnya dilakukan analisis terhadap kristal CaSO_4 yang terbentuk antara lain, untuk menganalisis gugus fungsi inhibitor menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), dan untuk mengetahui komponen senyawa kimianya dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Analisis selanjutnya untuk mengetahui perubahan morfologi digunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), untuk mengetahui jenis kristal yang terbentuk digunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) sedangkan untuk analisis distribusi ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh penambahan campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4).
2. Mengetahui keefektifan campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat sebagai inhibitor kalsium sulfat (CaSO_4) melalui analisis data dan karakterisasi menggunakan SEM, XRD, PSA, GC-MS, dan FTIR.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah dapat mengetahui pengaruh penambahan campuran asap cair dari kondensasi *pyrolysis* pada cangkang kelapa sawit dengan ekstrak daun alpukat terhadap pertumbuhan kerak (CaSO_4).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kerak

Kerak merupakan endapan mineral yang disebabkan oleh meningkatnya suhu membentuk lapisan yang sulit dihilangkan sehingga dapat mengurangi kapasitas suatu aliran karena diameter pipa sebagai aliran fluida pada sistem mengecil. Kerak terjadi dikarenakan adanya suatu lapisan oksida yang terdeposit dari senyawa-senyawa organik maupun anorganik yang mengendap pada pipa yang disebabkan oleh pengkristalan ion mineral dalam air. Pada proses kristalisasi yaitu proses terbentuknya partikel-partikel padatan dalam suatu fasa yang seragam, atau homogen (Susilowati dkk., 2024). Faktor-faktor yang mempengaruhi endapan kerak dan pertumbuhan suatu kristal adalah berasal dari supersaturasi, temperatur, tekanan, kekuatan ion, evaporasi, waktu kontak, dan pH. Kerak terbentuk dari pengendapan senyawa-senyawa anorganik yang mengkristal dan menumpuk di permukaan suatu mineral. Kristal-kristal ini memiliki muatan ion yang lebih rendah dan cenderung bergumpal, sehingga membentuk lapisan kerak pada sistem fluida di industri (Sudarmaji dan Hadi, 2021).

Kerak yang terbentuk disebabkan oleh endapan yang mengeras dan menempel pada permukaan pipa dikarenakan adanya unsur-unsur pembentuk kerak dalam air, seperti faktor suhu dan konsentrasi ion Ca^{2+} dapat meningkatkan jumlah kerak. Selain itu, unsur-unsur lainnya yang berperan dalam pembentukan kerak antara lain magnesium (Mg) dan besi (Fe) dalam bentuk karbonat, serta kalsium (Ca) dalam bentuk sulfat. Kerak terbentuk pada peralatan yang bersentuhan dengan air, seperti pipa produksi, pipa selubung, pipa alir, dan peralatan produksi di permukaan. Selain itu, kerak juga bisa muncul akibat penggunaan campuran air

yang tidak sesuai, yang menyebabkan reaksi kimia dan pengendapan mineral saat air tersebut dicampurkan (Suharso dan Buhani, 2015). Pipa aliran fluida yang tersumbat akan mengalami pengurangan volume aliran fluida dan peningkatan kekasaran pada permukaan bagian dalam pipa, seperti terlihat pada Gambar 1. Kerak yang umum dijumpai pada pipa-pipa industri yaitu kalsium karbonat (CaCO_3), kalsium sulfat (CaSO_4), barium sulfat (BaSO_4), strontium sulfat (SrSO_4), besi oksida (Fe_2O_3), besi sulfat (FeS), besi hidroksida, kalsium dan seng fosfat (Ca dan $\text{Zn}_2(\text{PO}_4)$), besi fosfat ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$), dan magnesium karbonat (MgCO_3).



Gambar 1. Endapan kerak pada pipa (Anonim, 2024)

2.2. Faktor Pembentuk Kerak

Pada pembentukan kerak pada pipa-pipa industri, terdapat faktor yang berpengaruh terhadap pembentukan suatu kerak yaitu terdapat perubahan reservoir seperti penurunan tekanan reservoir dan perubahan temperatur pada aliran fluida, pencampuran dua jenis air yang mempunyai susunan mineral yang tidak sesuai, seperti adanya keadaan larutan yang mengandung zat terlarut melebihi jumlah yang perlu untuk mencapai kejenuhan, penguapan akibat dari perubahan konsentrasi, pengadukan, dan waktu kontak antara kerak dengan permukaan pipa serta perubahan pH air.

Kerak yang menumpuk dapat diamati terbentuk akibat akumulasi inti-inti kristal. Ukuran kristal yang terbentuk pada pengendapan akan berbentuk terhadap pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal. Pada laju pertumbuhan

kristal menjadi faktor penting dalam mempengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama terjadinya pengendapan. Semakin tinggi laju pertumbuhan, maka kristal yang terbentuk akan besar. Proses laju pertumbuhan kristal dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, yaitu:

1. Kristalisasi

Kristalisasi adalah proses pembentukan butiran-butiran zat padat yang teratur (kristal) dari suatu larutan. Ketika larutan terlalu banyak mengandung zat terlarut, zat ini akan mulai mengendap dan membentuk kristal-kristal kecil. Proses ini seringkali terjadi ketika larutan didinginkan atau diuapkan (Susilowati dkk., 2024). Kristalisasi terjadi dikarenakan fasa padatan terbentuk dari fasa *liquid* pada kondisi lewat jenuhnya (*supersaturated*). Proses pembentukan fasa padatan pada kristalisasi akan berlangsung secara terus-menerus hingga larutan akan mencapai kesetimbangan atau kondisi jenuh (*saturated*).

Kristalisasi terbentuk melalui dua tahapan, yaitu tahap nukleasi atau pembentukan inti kristal dan tahap pertumbuhan kristal. Pada tahapan nukleasi, yaitu tahap awal dalam pembentukan kristal, dimana atom, ion, atau molekul berkumpul membentuk inti kecil atau disebut dengan inti kristal. Tahap kedua yaitu pertumbuhan kristal, yaitu tahapan dimana atom, ion, atau molekul dari larutan, atau gas akan terus menempel pada permukaan inti kristal, sehingga dapat memperbesar ukuran kristal. Tahap pembentukan kristal sangat dipengaruhi oleh kondisi seperti suhu, tingkat saturasi, dan ketersediaannya zat terlarut (Rahmadina dkk., 2020).

2. Kelarutan Endapan

Endapan merupakan suatu zat padat yang terbentuk dari larutan sebagai hasil dari reaksi-reaksi kimia atau adanya perubahan kondisi fisik seperti suhu dan tekanan yang dapat menyebabkan zat terlarut akan terpisah dari larutan. Endapan sering terjadi saat adanya dua larutan dicampurkan dan menghasilkan senyawa yang tidak larut dalam pelarut yang digunakan, sehingga senyawa tersebut dapat keluar dari larutan sebagai suatu padatan.

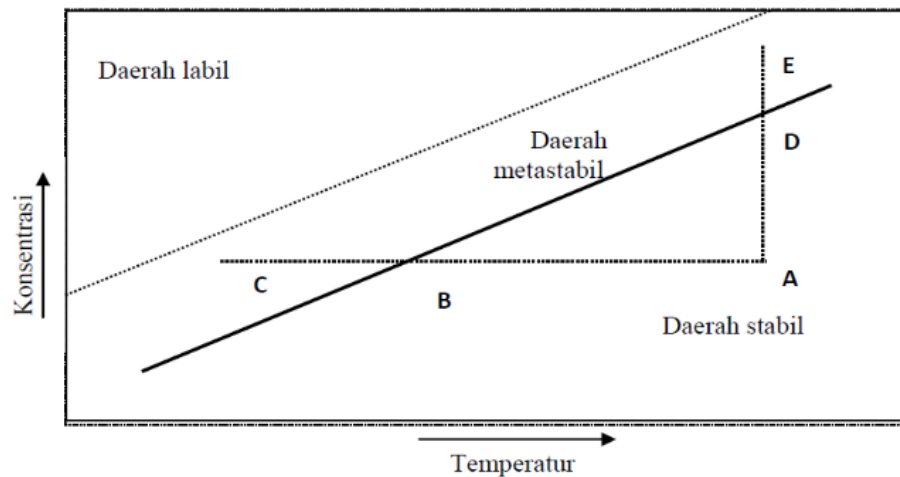
Endapan yang diperoleh sempurna memerlukan faktor yaitu dengan mengatur kelarutan endapan sekecil mungkin. Kelarutan endapan bergantung dengan berbagai kondisi, seperti temperatur, tekanan, konsentrasi, bahan-bahan lain dalam larutan, dan pada komposisi pelarut (Suharso dan Buhani, 2015).

Kelarutan juga dipengaruhi oleh sifat dan konsentrasi zat-zat lain, terutama ion-ion dalam campuran. Terdapat perbedaan signifikan antara pengaruh ion sejenis dan ion asing. Ion sejenis adalah ion yang juga merupakan bagian dari bahan endapan. Biasanya, keberadaan ion sejenis dalam jumlah berlebih akan secara signifikan mengurangi kelarutan endapan, meskipun efek ini bisa diimbangi oleh terbentuknya senyawa larut dengan ion sejenis tersebut. Di sisi lain, kehadiran ion asing akan sedikit meningkatkan kelarutan endapan, kecuali jika terjadi reaksi kimia seperti pembentukan senyawa atau reaksi asam-basa, yang dapat meningkatkan kelarutan secara lebih signifikan.

3. Derajat Lewat Jenuh (Supersaturasi)

Kristal dapat terbentuk karena adanya kondisi supersaturasi. Supersaturasi adalah kondisi dimana konsentrasi padatan (zat terlarut) dalam suatu larutan melebihi konsentrasi kesetimbangan yang seharusnya. Keadaan saturasi suatu larutan harus memiliki molekul dengan muatan ion yang lebih rendah dimana molekul-molekul cenderung berkumpul dan akan membentuk suatu kerak (Sudarmaji dan Hadi, 2021).

Kondisi kelarutan lewat jenuh atau saturasi dapat diperoleh dengan cara jalan pendinginan larutan pekat panas, penguapan larutan encer, kombinasi proses penguapan, dan pendinginan serta dengan penambahan zat lainnya untuk menurunkan kelarutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuh, maka akan semakin besar kemungkinan pembentukan inti baru dan akan menyebabkan semakin besarnya laju pembentukan inti yang mengakibatkan kristal akan terbentuk semakin besar. Adapun diagram yang menggambarkan larutan lewat jenuh yang dipengaruhi oleh temperatur dan konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram temperatur-konsentrasi (Suharso dan Buhani, 2015)

Berdasarkan Gambar 2, didapatkan garis tebal yang menunjukkan bahwa kelarutan normal zat terlarut dalam pelarut, sementara garis putus-putus mewakili kurva lewat jenuh, yang posisinya dalam diagram dipengaruhi oleh zat pengotor. Di daerah stabil (tidak jenuh), kristalisasi tidak akan terjadi. Di daerah metastabil (lewat jenuh), kristalisasi mungkin terjadi, tetapi tidak secara spontan. Di daerah labil, kristalisasi terjadi dengan nukleasi yang bisa berlangsung secara spontan. Jika larutan pada titik A didinginkan tanpa kehilangan pelarut hingga melewati kurva kelarutan sepanjang ABC, nukleasi spontan tidak akan terjadi sampai titik C tercapai. Pengurangan pelarut pada suhu konstan ditunjukkan oleh garis ADE, yang dapat menyebabkan supersaturasi (Suharso dan Buhani, 2015).

2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak

Kerak terbentuk biasanya pada dinding-dinding pipa yang dialiri suatu fluida yang bersifat garam. Pada keadaan lewat jenuh, garam-garam tersebut akan mengendap dan menempel pada dinding pipa dan akan menghambat laju aliran atau sering disebut dengan pembentukan kerak. Adapun prinsip dari mekanisme pertumbuhan kerak adalah sebagai berikut.

1. Campuran dua air garam yang tidak sesuai (umumnya air formasi yang mengandung kation yang berlimpah seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , dan Sr^{2+} yang bercampur dengan sulfat dan terdapat berlimpah dalam air laut, dan menghasilkan kerak sulfat seperti CaSO_4 , SrSO_4 , dan BaSO_4).
2. Penurunan tekanan dan kenaikan temperatur air garam, yang dapat menurunkan kelarutan garam (umumnya mineral yang paling banyak mengendap adalah kerak karbonat seperti CaCO_3 dan MgCO_3).
3. Penguapan air garam, menghasilkan peningkatan konsentrasi garam melebihi batas kelarutan dan membentuk endapan garam (Suharso dan Buhani, 2015).

Pada pembentukan kerak, terdapat tiga tahapan pokok pada proses pembentukannya, yakni:

1. Tahap Pembentukan Inti Kristal (Nukleasi)

Nukleasi adalah proses pertama pembentukan kristal, dimana molekul-molekul atau partikel-partikel ion yang terdapat pada suatu cairan akan berkumpul membentuk inti-inti kristal. Pada proses ini, sering terjadi secara spontan saat larutan sudah mencapai titik jenuhnya atau dimulai dengan bantuan partikel-partikel kecil atau permukaan yang memungkinkan partikel ion akan menempel dan membentuk kristal. Inti kristal yang terbentuk memiliki struktur yang sangat halus sehingga tidak akan mengendap saat cairan mengalir.

Nukleasi dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan pembentukannya, yaitu nukleasi primer dan sekunder. Nukleasi primer terjadi dalam sistem yang sama sekali belum memiliki kandungan kristal dan terjadi secara spontan dikarenakan tercapainya supersaturasi atau disebut dengan nukleasi homogen, sedangkan nukleasi primer yang terjadi karena adanya induksi partikel-partikel lain disebut dengan nukleasi heterogen. Nukleasi sekunder merupakan nukleasi yang disebabkan oleh induksi dari kristal yang sudah terkandung dalam larutan induk dan adanya kontak dengan sesama partikel kristal seperti tumbukan kristal dengan dinding *crystallizer* dan *agitator*, maupun *shear stress fluida*. Pada kondisi supersaturasi yang cukup tinggi akan menyebabkan adanya nukleasi. Nukleasi juga dipengaruhi oleh temperatur, bibit, dan *impurities*.

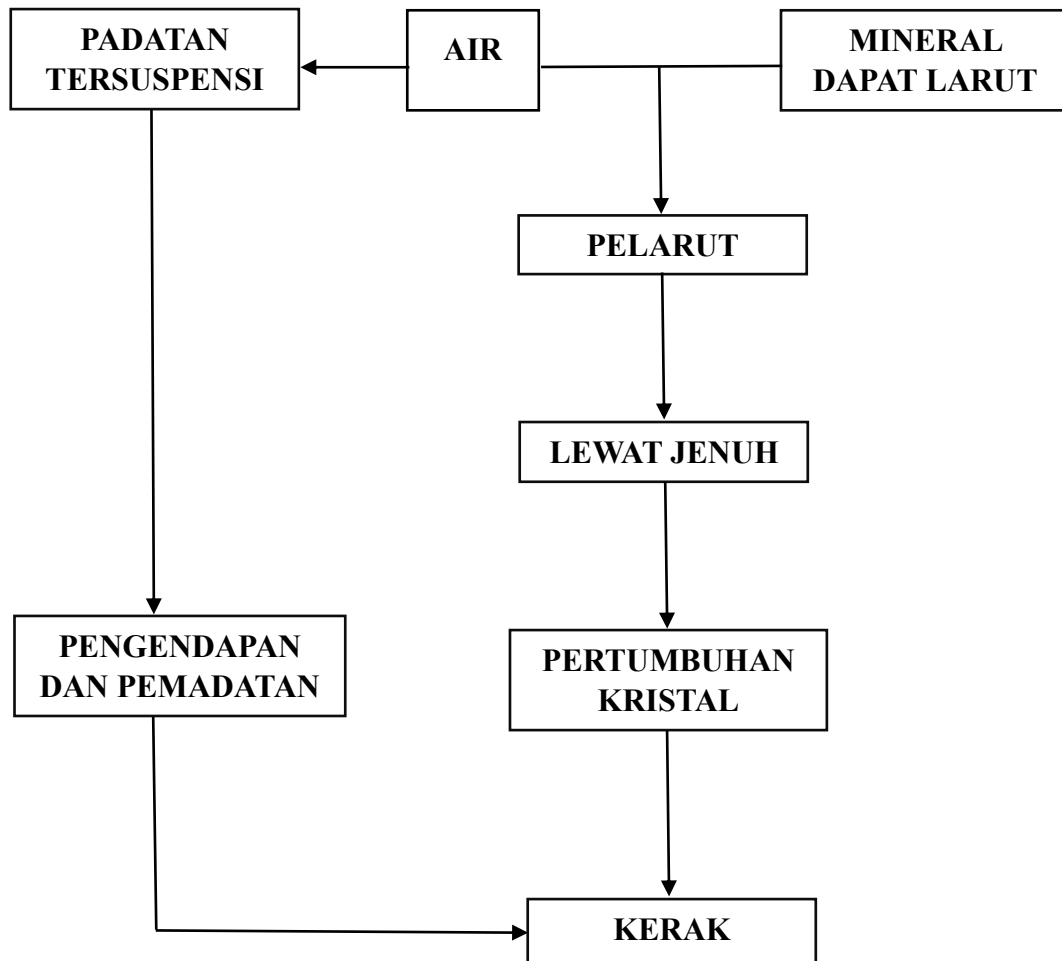
Pada nukleasi homogen, dimulai dengan pengelompokan ion-ion untuk membentuk inti kristal kecil. Inti kristal yang tumbuh melalui penambahan ion yang menempel pada permukaan kristal yang tidak sempurna. Hal ini menyebabkan ukuran kristal akan meningkat dan kristal akan menjadi lebih besar sehingga membentuk suatu gugus (*cluster*). Pada proses nukleasi heterogen membentuk kristal atau disebut dengan nukleon yang memiliki periode inisiasi yang lebih singkat saat tumbuh dan melekat pada pipa atau kerak yang sudah ada sebelumnya (Dera, 2018).

2. Tahap Pertumbuhan Inti

Selama tahap pertumbuhan inti, kristal akan menarik molekul-molekul lain untuk bergabung, sehingga inti tersebut berkembang menjadi partikel yang lebih besar, dengan diameter sekitar 0,001 hingga 0,1 μ (ukuran koloid). Pertumbuhan kristal kemudian berlanjut hingga mencapai diameter 0,1 hingga 10 μ (ukuran kristal halus). Setelah kristal mencapai ukuran lebih dari 10 μ (kristal kasar), kristal tersebut akan mulai mengendap (Panjinugroho, 2016).

3. Tahap Pengendapan Kristal

Pada tahap pengendapan kristal, kristal kasar yang telah dihasilkan dari proses pertumbuhan kristal akan diendapkan. Kecepatan pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh ukuran dan berat jenis kristal yang membesar pada tahapan sebelumnya. Proses pembentukan dipengaruhi oleh adanya aliran fluida pembawa, dimana kristal akan mengendap apabila kecepatan pengendapan lebih besar dari kecepatan aliran fluida (Panjinugroho, 2016).



Gambar 3. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air (Salimin dan Gunandjar, 2007)

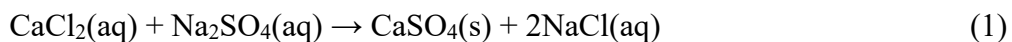
2.4. Kalsium Sulfat (CaSO_4)

Kalsium adalah ion Ca^{2+} berbentuk bebas dan bersifat aktif. Kalsium adalah logam berwarna putih perak yang bersifat lunak dan memiliki sifat mudah bereaksi dengan oksigen dan air. Dipertemukan kalsium yang membentuk gabungan atau kompleks dengan anionnya seperti bikarbonat, laktat, fosfat, dan sitrat. Kalsium sulfat (CaSO_4) adalah garam yang muncul secara alami dan juga dihasilkan sebagai produk sampingan dari beberapa proses industri. Senyawa ini terdiri dari kalsium, sulfur, dan oksigen, dengan rumus kimia CaSO_4 dalam bentuk murni. Kalsium sulfat dikenal dalam bentuk anhidrat, tanpa air, dan disebut anhidrit mineral. Selain itu, ada juga bentuk "*hydrated*" yang dikenal sebagai gipsum, dengan rumus $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Berbagai bentuk ini memiliki kegunaan

yang beragam, seperti dalam konstruksi, pelembab, pembuatan cetakan untuk perawatan kaki retak, dan seni.

Kristal kalsium sulfat terdapat dalam beberapa fasa, seperti *gypsum* ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), basanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), dan anhidrit (CaSO_4). Kalsium sulfat (CaSO_4) berperan sebagai salah satu komponen endapan yang dapat menyebabkan pembentukan kerak, yang berdampak pada penurunan kinerja boiler dan mengurangi kapasitas penukar panas, terutama dalam proses dengan air bertekanan tinggi. Keberadaan kerak ini dapat merusak dan menurunkan efisiensi peralatan yang digunakan.

Kalsium sulfat (CaSO_4) umum ditemukan dalam industri minyak serta sektor lainnya. Pembentukan kerak CaSO_4 terjadi melalui reaksi antara ion kalsium (Ca^{2+}) dari CaCl_2 dan ion sulfat (SO_4^{2-}) dari Na_2SO_4 yang tidak larut dalam air. Proses reaksi yang menghasilkan endapan dan kerak kalsium sulfat dapat dijelaskan sebagai berikut:



(Suharso dan Buhani, 2015).

Faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan kerak kalsium sulfat meliputi perubahan kondisi reservoir seperti tekanan dan temperatur, alkalinitas air, serta kadar garam terlarut. Kecenderungan untuk terbentuknya kerak kalsium sulfat akan meningkat dengan (Sundjono dan Saefudin, 2014).

1. Peningkatan temperatur,
2. Penurunan tekanan parsial CO_2 ,
3. Kenaikan pH,
4. Laju aliran,
5. Penurunan jumlah gas terlarut secara keseluruhan,
6. Pencampuran dua jenis air yang mempunyai susunan mineral yang tidak sesuai,
7. Waktu kontak antara padatan dengan permukaan media pengendapan.

Adanya endapan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) pada peralatan industri yang dapat merugikan proses industri, maka diperlukan pencegahan pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) untuk mengurangi atau menghilangkan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) yang terdapat pada peralatan-peralatan industri terutama pada pipa aliran fluida.

2.5. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak

Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terbentuknya kerak kalsium sulfat (CaSO_4) pada peralatan-peralatan industri antara lain:

1. Pengendalian pH

Salah satu metode pencegahan terbentuknya kerak yaitu dengan melakukan pengendalian pH. Pencegahan terbentuknya kerak dapat dilakukan dengan penambahan zat aditif asam sebagai inhibitor kerak tersebut. pH memiliki pengaruh yang signifikan terhadap adanya inhibitor, yaitu pH yang lebih tinggi akan meningkatkan protonasi dari inhibitor, sedangkan pH yang lebih rendah dapat mengurangi tingkat protonasi. pH larutan akan membuat molekul inhibitor terjadi lebih terionisasi sehingga dapat menghambat pertumbuhan inti kristal. Pertumbuhan kristal akan dicegah dengan adanya penggunaan aditif asam, namun dengan konsentrasi asam yang tinggi tidak efektif dikarenakan dapat meningkatkan laju korosi (Dera, 2018).

2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air

Pelunakan air disebut dengan penurunan kesadahan, atau suatu metode yang dipakai untuk mengurangi konsentrasi ion kalsium, magnesium, dan ion-ion lainnya dalam air yang memiliki tingkat kesadahan tinggi. Proses pelunakan air dapat mengurangi dan menghilangkan pada air sehingga didapatkan air yang memiliki kandungan mineral yang rendah (Gifari dkk., 2022).

Masalah kerak dapat dihindari apabila menggunakan air yang bebas mineral, karena seluruh kandungan garam terlarut bisa dihilangkan. Dengan demikian, air bebas mineral menjadi solusi yang efektif untuk mencegah terbentuknya kerak pada sistem yang beroperasi pada suhu tinggi. Namun, dalam skala

industri besar, penggunaan air bebas mineral sering kali memerlukan biaya tinggi, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi efisiensi operasional.

3. Penggunaan Inhibitor Kerak

Inhibitor kerak merupakan substansi kimia yang ditambahkan pada pipa aliran fluida secara terus menerus untuk menekan pembentukan kerak. Inhibitor kerak atau penghambat kerak adalah zat yang bereaksi dengan bahan kimia pembentuk kerak untuk menstabilkan dan menekan pertumbuhan kristal.

Inhibitor kerak digunakan karena merupakan cara yang ekonomis dan sederhana serta efektif untuk mencegah pembentukan kerak. Inhibitor kerak secara kimiawi dapat dikategorikan menjadi dua tipe, yaitu inhibitor termodinamika dan kinetika. Penghambat termodinamika adalah zat pengkompleks dan agen khelat yang dapat mengikat kerak yang tumbuh dan mencegah pembentukan dan pengendapan kristal. Pada proses inhibitor kerak secara termodinamika termasuk terbatas pada air yang mengandung konsentrasi garam yang rendah. Inhibitor kerak dengan tipe kinetika memiliki prinsip memperlambat laju pengendapan kerak terbentuk. Pada tipe kinetika dapat mempengaruhi kinetika nukleasi, pertumbuhan kristal, dan dapat terjadinya supersaturasi tanpa adanya pembentukan kerak (Husna *et al.*, 2022).

Kerak kalsium sulfat (CaSO_4) dapat dicegah pembentukannya dengan memanfaatkan inhibitor. Inhibitor ini berfungsi untuk mengendalikan pertumbuhan kristal dan mengubah bentuknya, sehingga dapat menghambat proses pembentukan kerak. Inhibitor terbukti efektif dalam mengatur proses inisiasi dan pertumbuhan kristal yang terjadi pada permukaan kristal yang berkembang. Penggunaan inhibitor juga mempengaruhi jumlah kerak yang terbentuk. Semakin tinggi konsentrasi inhibitor yang digunakan, semakin sedikit massa kerak yang dihasilkan (Raharjo, 2020).

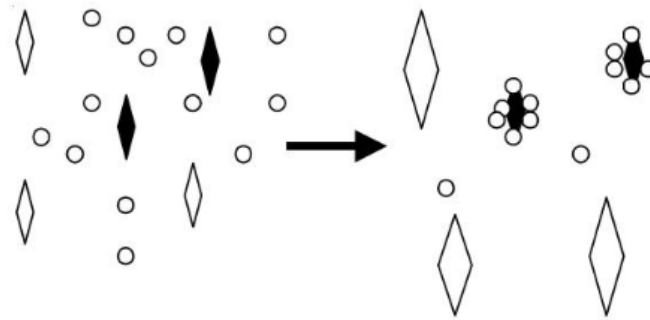
Inhibitor yang akan digunakan untuk menghambat suatu endapan harus memiliki beberapa ketentuan penggunaannya, yaitu tidak menyebabkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan dan aman bagi manusia,

menunjukkan kestabilan termal yang cukup efektif untuk mencegah terbentuknya air sadah dari pembentukan kerak, dan dapat merusak struktur kristal dari padatan tersuspensi lain yang mungkin akan terbentuk. Inhibitor kerak pada umumnya yang digunakan untuk menghambat endapan pada pipa aliran fluida industri dibagi menjadi dua macam, yaitu inhibitor anorganik dan inhibitor organik. Inhibitor kerak akhir-akhir ini dipilih dan difokuskan pada sifatnya yang tidak beracun dan efektif, atau saat ini disebut dengan *green inhibitor* yang artinya inhibitor yang digunakan diperoleh dari produk alami seperti ekstrak dari daun, produk makanan seperti tempe, buah-buahan dan banyaknya inhibitor saat ini memanfaatkan bahan organik yang tidak dikonsumsi lagi oleh manusia atau menjadi limbah sehingga dapat dikatakan inhibitor yang ramah lingkungan (Sedik *et al.*, 2020).

Mekanisme kerja inhibitor kerak terbagi menjadi dua (Suharso dkk., 2007), yaitu.

1. Inhibitor kerak mampu mengadsorpsi pada permukaan kristal saat proses pembentukan kerak dimulai. Inhibitor tersebut adalah kristal berukuran besar yang dapat menutupi kristal yang lebih kecil dan menghambat pertumbuhannya,
2. Dalam banyak hal bahan kimia dapat dengan mudah mencegah partikel-partikel menempel pada permukaan padat.

Mekanisme kerja inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dapat dijelaskan melalui Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan bagaimana inhibitor bekerja dengan mengadsorpsi pada area pertumbuhan kristal dari bibit kristal (diwakili oleh kristal berwarna hitam), sehingga pertumbuhan kristal tersebut terhambat. Sebaliknya, bibit kristal yang tidak teradsorpsi oleh inhibitor (diwakili oleh kristal yang tidak berwarna) mengalami pertumbuhan seperti normal (Suharso dkk., 2009; Suharso dkk., 2014).



Gambar 4. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ($\diamond$ = bibit kristal, $\circ$ = inhibitor) (Suharso dkk., 2014).

2.6. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan pemasok terbesar hasil perkebunan Indonesia setiap tahunnya tetapi menghasilkan sejumlah limbah yang besar dari hasil industrinya. Limbah yang dihasilkan dari industri Perkebunan kelapa sawit dapat berupa limbah padat maupun limbah cair. Limbah kelapa sawit merujuk pada sisa-sisa dari tanaman kelapa sawit yang tidak dianggap sebagai produk utama atau merupakan hasil sampingan dari proses pengolahannya. Limbah padat kelapa sawit dapat berupa tandan kosong, cangkang, janjang, dan *fiber* (sabut). Limbah yang dihasilkan dari industri pengolahan kelapa sawit antara lain janjang kosong, limbah cair, limbah *solid* (padatan) dan cangkang (Haji, 2013).

Limbah padat kelapa sawit ditangani dengan cara dibakar, dibuang atau dibiarkan membusuk di sekitar kebun dan menjadi pupuk organik bagi tanaman, namun untuk membusuk dan menghasilkan pupuk organik membutuhkan waktu yang lama, memakan tempat yang besar, dan mencemari lingkungan karena menimbulkan bau busuk. Berdasarkan dampak tersebut, penumpukan dan pembakaran bukan merupakan metode yang efektif untuk penanganan permasalahan limbah industri kelapa sawit (Sampepana dan Fauziati, 2021).

Penanganan limbah kelapa sawit yang diharapkan adalah penanganan yang menjadikan limbah memiliki nilai ekonomis tinggi, efektif, dan ramah lingkungan. Salah satu penanganan yang dapat dimanfaatkan untuk menangani limbah industri kelapa sawit adalah melalui metode pirolisis. Metode pirolisis adalah proses dekomposisi termal suatu senyawa organik secara cepat dengan suhu tinggi (200-600 °C) dalam keadaan tanpa oksigen. Produk yang dihasilkan dari metode pirolisis adalah biochar, cairan, dan gas (Yanti dkk., 2022). Biochar yang dihasilkan dari metode pirolisis dapat digunakan untuk bahan baku bio-briket. Bio-briket merupakan bahan baku padat dari bahan organik yang mengandung karbon, nilai kalor tinggi, dan dapat menyala dalam waktu yang lama. Sedangkan cairan yang dihasilkan, didapatkan dari asap yang dikeluarkan dan dicairkan menjadi destilat dengan menggunakan konsensor sehingga tidak menimbulkan pencemaran lingkungan dan dinamakan asap cair.

Asap cair merupakan hasil dari proses kondensasi atau pengembunan uap yang dihasilkan oleh pembakaran, yang diperoleh melalui pirolisis bahan-bahan yang mengandung komponen selulosa, asam, hemiselulosa, dan lignin. Asap cair berwarna hitam pekat dan berasal dari biomassa seperti kayu, kulit kayu, serta limbah biomassa lainnya, termasuk limbah hasil hutan dan industri kehutanan, yang diolah melalui pirolisis. Cairan ini mengandung unsur karbon, hidrogen, dan oksigen. Asap cair juga mengandung asam organik, dengan air sebagai salah satu komponennya, namun air tersebut tidak bertindak sebagai kontaminan seperti yang ditemukan pada petroleum, karena airnya bercampur secara alami dengan asap cair. Asap cair memiliki beberapa manfaat, yaitu sebagai bahan pengawet alami, bahan koagulan lateks pengganti asam format, membantu pembentukan warna coklat pada produk lembaran, menurunkan kadar timbal pada biji kedelai, insektisida organik (Sarwendah dkk., 2019) dan sebagai inhibitor.

Asap cair hasil metode pirolisis memiliki komposisi yang berbeda-beda tergantung dengan jenis bahan baku yang digunakan saat proses pirolisis berlangsung. Asap cair memiliki komponen terbesar yaitu air. Komponen lain penyusun asap cair seperti fenol, karbonil, asam, furan, dan polisiklik

hidrokarbon aromatik. Kualitas asap cair sangat ditentukan oleh kadar fenol dan asam, karena senyawa tersebut memiliki peran sebagai zat antimikroba. Semakin tinggi kadar fenol, maka semakin tinggi kemampuan asap cair menghambat pertumbuhan bakteri. Semakin rendah nilai pH, maka asap cair yang dihasilkan berkualitas tinggi. Komposisi kimia dari asap cair cangkang kelapa sawit yang paling tinggi yaitu asam asetat dan fenol (Sarwendah dkk., 2019).

Menurut Bancin dkk., (2021), kandungan fenol asap cair cangkang kelapa sawit paling tinggi dibandingkan dengan asap cair pelepah dan tandan kosong kelapa sawit. Kandungan fenol pada cangkang kelapa sawit lebih tinggi dari tandan kosong kelapa sawit, yaitu 20,24 % dan 16,88 %. Semakin banyak kandungan lignin pada biomassa yang digunakan dan semakin tinggi suhu pada proses pirolisis, maka semakin banyak hasil fenol yang didapatkan pada asap cair yang dihasilkan. Pada penelitian Bancin dkk., (2021), menggunakan metode pirolisis dengan mempersiapkan biomassa yang dikeringkan dengan panas matahari minimal 3 hari dan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis pada suhu 350 °C dengan variasi waktu yang berbeda yaitu 60, 90, 120, 150, dan 180 menit. Hasil rendemen asap cair maksimal yang didapatkan adalah pada waktu 180 menit sebesar 11,01 %.

Asap cair cangkang kelapa sawit berdasarkan penelitian Woesono (2011), memiliki beberapa sifat fisik yang diteliti yaitu meliputi kadar air dan berat jenis pada asap cair cangkang kelapa sawit yang digunakan. Kadar air yaitu perbandingan berat air dari bahan dengan berat kering bahan yang dinyatakan dalam persen. Semakin rendah kadar air cangkang kelapa sawit, maka semakin tinggi nilai berat jenisnya. Kadar air cangkang kelapa sawit dapat mempengaruhi proses dan rendemen asap cair yang dihasilkan. Kadar air yang tinggi menyebabkan lamanya proses pembentukan asap cair atau metode pirolisis yang digunakan karena proses karbonisasi akan lebih lama dan tidak sempurna, dan membutuhkan suhu saat proses pirolisis lebih tinggi dan menghasilkan rendemen asap cair yang rendah serta menghasilkan rendemen arang yang dihasilkan tinggi. Pada penelitian yang telah dilakukan, pengujian berat jenis dilakukan untuk

membandingkan bahan pirolisis antara cangkang kelapa sawit dan tempurung kelapa, dan mendapatkan hasil bahwa cangkang kelapa sawit lebih keras sehingga proses karbonisasi semakin lama dan membutuhkan suhu pirolisis yang lebih besar dan asap cair yang dihasilkan dapat lebih banyak.

2.7. Ekstrak Daun Alpukat (*Persea americana miller*)

Tanaman alpukat (*Persea americana* Mill.) merupakan tanaman buah berupa pohon. Tanaman alpukat berasal dari dataran rendah Amerika Tengah dan diperkirakan masuk ke Indonesia pada abad ke-18. Tanaman alpukat termasuk dalam famili *Lauraceae* yaitu keluarga pohon. Tanaman alpukat memiliki ketahanan dan dapat tumbuh di berbagai kondisi, serta memiliki nilai ekonomis yang tinggi sebagai sumber pangan. Adapun tanaman alpukat ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tanaman Alpukat (*Persea americana* Mill.) (Aeni, 2023).

Klasifikasi ilmiah tanaman alpukat adalah sebagai berikut.

Kingdom	: Plantae
Subkingdom	: Tracheobionta
Superdivisi	: Spermatophyta
Divisi	: Magnoliophyta
Kelas	: Dicotyledons
Subkelas	: Magnoliidae
Ordo	: Laurales
Family	: Lauraceae

Genus : *Persea*
 Species : *Persea americana* Mill.

Tanaman alpukat merupakan tanaman yang memiliki manfaat sebagai obat tradisional. Daun alpukat sering dimanfaatkan untuk berbagai pengobatan penyakit. Bagian ini dikenal secara tradisional dapat membantu mengatasi beberapa masalah kesehatan, seperti batu ginjal, menurunkan tekanan darah, serta memiliki sifat antihipertensi, antiinflamasi, diuretik, dan antibakteri. Buah alpukat memiliki manfaat yaitu menjaga berat badan, menjaga kesehatan mata, jantung, mencegah dan mengatasi sembelit, dan dapat menurunkan resiko gangguan metabolik. Sedangkan biji alpukat dapat digunakan sebagai obat di Nigeria dalam mengobati penyakit darah tinggi (Hartati dkk., 2022).

2.8. Metode *Seeded Experiment*

Pada penelitian ini menggunakan metode penelitian *seeded experiment*. Metode ini merupakan salah satu teknik untuk membentuk kristal dengan menambahkan kristal awal (bibit) ke dalam larutan pertumbuhan. Penambahan kristal awal bertujuan untuk mempercepat proses kristalisasi. Kristal awal memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga dapat mempermudah pertumbuhan kristal yang lebih besar. Semakin cepat proses kristalisasi berlangsung, semakin cepat pula laju pertumbuhan inti kristal kalsium sulfat (CaSO_4), yang pada akhirnya menghasilkan kristal yang lebih besar dalam waktu singkat. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati laju pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) setelah penambahan inhibitor dan kristal awal (*seeded experiment*) (Rahmania, 2012).

2.9. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4)

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa analisis dan karakterisasi kerak kalsium sulfat (CaSO_4). Adapun analisis yang dilakukan yaitu menggunakan

spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) untuk mengidentifikasi struktur dari suatu senyawa dan mengetahui gugus fungsional utama dalam suatu sampel. Analisis menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) untuk mengetahui adanya komponen senyawa kimia pada inhibitor. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi CaSO_4 . Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengukur distribusi ukuran partikelnya. Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristal dari kerak kalsium sulfat (CaSO_4). Analisis dan karakterisasi yang dilakukan pada penelitian ini memiliki tujuan agar dapat mengetahui keefektifitasan inhibitor campuran ekstrak daun alpukat dan asap cair cangkang kelapa sawit dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4).

2.9.1. Spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) merupakan spektroskopi inframerah yang dilengkapi dengan transformasi fourier untuk menganalisis hasil spektrumnya. Data spektrogram yang dihasilkan oleh FTIR yang berasal dari sampel sebelum dan sesudah purifikasi yang diperiksa memberikan informasi mengenai jenis-jenis vibrasi gugus fungsional pada sampel yang secara tidak langsung dapat mengindikasikan keberadaan mineral dan senyawa pengotor lainnya. Setiap gugus fungsi memiliki pola serapan yang unik, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi tersebut dalam suatu material (Hulungo dkk., 2022).

Prinsip kerja FTIR adalah untuk mengidentifikasi senyawa, mendeteksi gugus fungsi, dan menganalisis campuran dan sampel yang akan dianalisis. Spektroskopi ini memiliki dasar pada vibrasi suatu molekul. Spektroskopi inframerah merupakan suatu metode yang mengamati interaksi molekul dengan radiasi elektromagnetik yang berada pada daerah panjang gelombang pada bilangan gelombang $7.500 - 350 \text{ cm}^{-1}$.

Spektrum inframerah suatu molekul dihasilkan dari transisi antara tingkat energi getaran yang berbeda. Atom-atom yang terikat oleh ikatan kovalen mengalami getaran atau osilasi, mirip dengan dua bola yang terhubung oleh pegas. Ketika molekul menyerap radiasi inframerah, energi yang diterima menyebabkan peningkatan amplitudo getaran atom-atom tersebut, sehingga molekul berada dalam keadaan vibrasi tereksitasi. Energi yang diserap kemudian dilepaskan dalam bentuk panas saat molekul kembali ke keadaan dasar. Panjang gelombang yang tepat untuk penyerapan oleh suatu jenis ikatan tergantung pada jenis getaran ikatan tersebut. Dengan demikian, ikatan yang berbeda (seperti C-H, C-C, C=O, C=C, O-H, dan lain-lain) akan menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang yang berbeda pula. Oleh karena itu, spektrometri inframerah dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi dalam suatu molekul (Kombongkila dkk., 2024). Nilai perkiraan daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsional seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsi (Kombongkila dkk., 2024).

Daerah Spektra (cm ⁻¹)	Kemungkinan Gugus Fungsi
3800 – 2700	C-H, O-H, N-H
2300 – 2000	C≡N, C≡C
1900 – 1500	C=C, C=O, C=N, N=O
1300 – 800	C-C, C-O, C-N

2.9.2. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS merupakan metode yang digunakan untuk memisahkan dan mengidentifikasi suatu komponen dalam suatu campuran sampel yang pada umumnya berupa senyawa-senyawa yang mudah menguap. GC-MS terdiri dari dua buah alat yaitu kromatografi gas dan spektrometri massa sebagai *detector*. GC-MS memiliki tujuan yaitu menjadi alat pemisah dari berbagai komponen pada sampel yang pemisahannya bergantung pada titik didih senyawa yang berada pada sampel yang dianalisis dan interaksi antara analit dengan fasa diam maupun fasa geraknya (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

Prinsip kerja GC-MS yaitu senyawa dengan titik didih yang tinggi memiliki waktu retensi yang lama. Senyawa yang lebih terikat dengan fasa cair pada permukaan fasa diam memiliki waktu retensi yang lebih lama. Spektrometri massa berfungsi untuk mendeteksi masing-masing molekul komponen yang telah dipisahkan pada sistem kromatografi gas. Prinsip kerja spektrometri massa yaitu menembak bahan yang akan dianalisis dengan berkas elektron dan secara kuantitatif akan mencatat hasilnya sebagai suatu spektrum fragmen ion positif. Fragmen tersebut akan berkelompok sesuai dengan massanya (Utami dkk., 2022).

Kandungan kimia dengan menggunakan alat GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) pada penelitian Haji, (2013) menunjukkan teridentifikasi 27 senyawa yang terkandung. Senyawa yang kandungannya banyak ditemukan pada asap cair cangkang kelapa sawit adalah fenol (21,02%), asam dodekanoat (7,61%), asam-1,2-benzenedikarboksilat (6,82%), 2-metoksi-fenol (6,46%), asam 8-heptadekanoat (6,19%), dan asam heksadekanoat (6,17%). Sedangkan pada penelitian Putri dkk., (2021) menyatakan hasil analisis GC-MS ekstrak daun alpukat menggunakan pelarut air, etil asetat, dan N-heksana menyatakan muncul beberapa senyawa yaitu seperti asam heksadekanoat (15,28%), asam 9-oktadekanoat (24,48%).

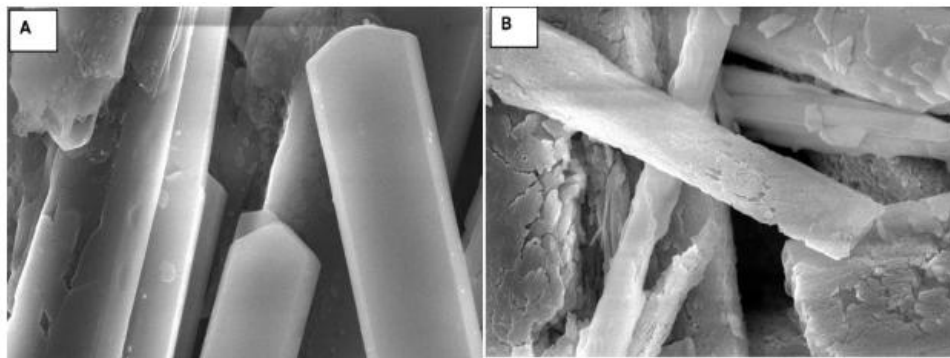
2.9.3. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning electron microscopy (SEM) merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk mengetahui morfologi suatu material. Pada sebuah mikroskop elektron (SEM) terdapat beberapa peralatan utama antara lain, pistol elektron yaitu berupa flamen yang terbuat dari unsur yang mudah melepas elektron, lensa untuk elektron berupa lensa magnetis, dan sistem vakum karena elektron sangat kecil dan ringan maka jika ada molekul udara yang lain elektron berjalan menuju sasaran akan terpecah oleh tumbukan sebelum mengenai sasaran sehingga menghilangkan molekul udara.

Menurut Rahmawati dan Nuraliyah, (2024). Prinsip kerja dari SEM yaitu, sebuah pistol elektron menghasilkan sinar elektron yang kemudian dipercepat oleh anoda.

Lensa magnetik berfungsi untuk memfokuskan elektron menuju sampel. Sinar elektron yang terfokus kemudian memindai seluruh permukaan sampel, dengan arah yang ditentukan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel, sampel tersebut akan memancarkan elektron baru yang akan ditangkap oleh detektor dan ditampilkan di monitor (CRT).

Penelitian Suharso dkk., (2014) melalui pengamatan morfologi kerak CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm dapat terlihat pada Gambar 7. Gambar 7 menunjukkan bahwa penambahan inhibitor membuat bentuk kerak CaSO_4 menjadi lebih kecil, rapuh, dan tidak beraturan dibandingkan dengan kerak CaSO_4 tanpa inhitor.



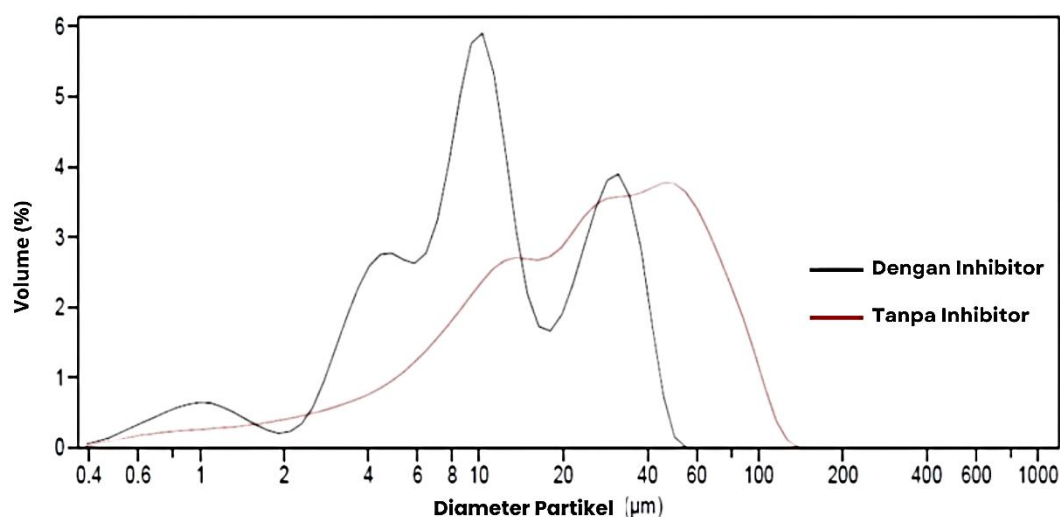
Gambar 6. Morfologi kerak CaSO_4 (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm (Suharso *et al.*, 2014).

2.9.4. Particle Size Analyzer (PSA)

Particle Size Analyzer (PSA) merupakan suatu metode analisa yang digunakan untuk mengetahui ukuran partikel dengan memanfaatkan hamburan cahaya yang ditembakkan ke sampel serta untuk mengukur volume yang dimiliki setiap partikel di dalam sampel tersebut. Spesimen yang diujikan dalam bentuk dispersi (Fitriani dkk., 2024). Prinsip kerja PSA yaitu dengan tipe *Dynamic Light Scattering* yaitu sampel akan ditembak dengan sinar laser dan akan terjadi penghamburan cahaya. Penghamburan cahaya akan dideteksi pada sudut tertentu secara cepat dan hasil pengukuran droplet dinyatakan sebagai diameter dari droplet yang terdapat pada medium *disperse*.

Analisis menggunakan PSA dalam penelitian ini untuk mengetahui distribusi ukuran partikel berukuran nanometer dari kerak kalsium sulfat (CaSO_4).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Suharso *et al.*, (2021), hasil analisis distribusi partikel dari kerak kalsium sulfat mengalami perubahan setelah menggunakan inhibitor dengan hasil yang dapat terlihat pada hasil PSA yang ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 7. Distribusi ukuran partikel CaSO_4 (Suharso *et al.*, 2021)

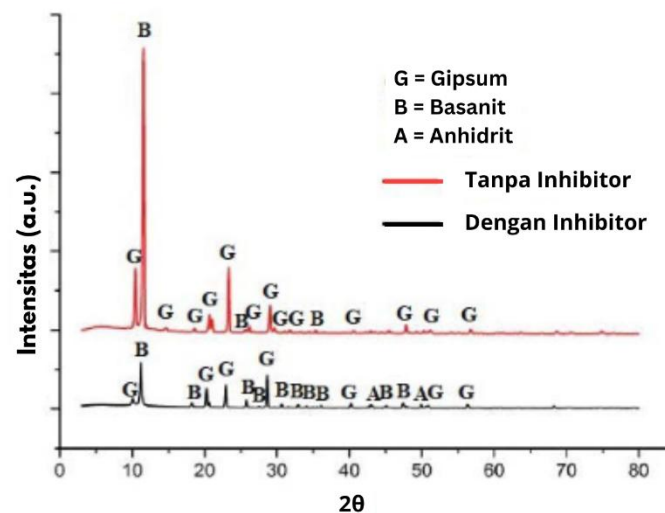
2.9.5. X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan mengukur parameter struktur kisi dan mendapatkan ukuran partikel. XRD memanfaatkan pemantulan sinar-X oleh kisi kristal untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam sebuah sampel dan digunakan untuk mengukur parameter struktur kisi seperti panjang ikatan dan sudut antara atom-atom dalam kisi kristal. Selain itu, teknik ini juga dapat memberikan informasi mengenai ukuran partikel, distribusi ukuran partikel, dan sifat kristal dari material tersebut. XRD merupakan alat yang sangat bermanfaat untuk karakterisasi material, terutama dalam bidang ilmu material dan kimia (Muhammad *et al.*, 2023).

Prinsip kerja XRD yaitu ketika sebuah sampel terkena sinar-X, sinar tersebut akan membuat elektron dalam atom sampel terlepas dari kulit dalam menuju kulit luar.

Proses ini meninggalkan kekosongan pada kulit dalam. Ketika kekosongan tersebut diisi oleh elektron dari kulit luar, sinar-X fluoresensi akan dipancarkan. Energi dari sinar-X fluoresensi ini sesuai dengan perbedaan energi antara kulit elektron yang terlibat dan merupakan karakteristik khusus untuk setiap unsur, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur tersebut.

Pola XRD yang terbentuk dari analisis menggunakan XRD pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui fasa kristalin yang terbentuk pada kerak CaSO_4 . Pada Gambar 9 terlihat contoh pola XRD pada kerak CaSO_4 tanpa inhibitor yang terdiri dari fasa gipsium dan basanit, sedangkan kerak CaSO_4 dengan penambahan inhibitor terdiri dari fasa gipsium, basanit, dan anhidrit.



Gambar 8. Pola XRD kristal CaSO_4 (Suharso dkk., 2019).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2024 sampai dengan Februari 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Analisis menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan di UPT Laboratorium Teknologi dan Sentra Inovasi Terpadu (LTSIT) Universitas Lampung, *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia, analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Laboratorium Fisika Terpadu Institut Teknologi Bandung, analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dilakukan di Laboratorium Layanan Analisa dan Pengukuran Kimia Universitas Brawijaya, sedangkan analisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang.

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu ; spatula, *waterbath* (Thermoscientific AC 200/S21), gelas-gelas plastik, pengaduk magnetik (Stuart CB 162), oven (merek Innotech), gelas kimia, labu ukur, gelas ukur, corong, pipet tetes, neraca analitik (Airshwoth AA-160), pH meter (Methrom 827), spektrofotometer IR (merek Cary 620 Agilent) diproduksi di Amerika Serikat, *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) merek Shimadzu QP 2010 SE diproduksi di Jepang, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merek JEOL JSM 6510 LA diproduksi di Jepang, *X-Ray Diffraction* (XRD) merek PANalytical

MPD PW3040/60 diproduksi di Belanda, dan *Particle Size Analyzer* (PSA) merek Cilas 1090D diproduksi di Perancis.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ; CaCl_2 anhidrat, Na_2SO_4 , akuades, kertas saring, asap cair tempurung kelapa sawit, dan ekstrak daun alpukat.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Inhibitor

3.3.1.1. Pembuatan ekstrak daun alpukat

Ekstrak daun alpukat dibuat dengan cara menghaluskan daun alpukat padat menggunakan cawan hingga halus untuk menghasilkan serbuk daun alpukat. Sebanyak 1 g serbuk daun alpukat dilarutkan dalam 1000 mL akuades untuk membuat larutan induk inhibitor ekstrak daun alpukat dengan konsentrasi 1000 ppm. Larutan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 3 jam pada suhu 90 °C, kemudian disaring menggunakan kertas saring.

Larutan induk diencerkan dengan konsentrasi yang bervariasi yaitu pada konsentrasi 50, 150, 250, dan 350 ppm. Pembuatan larutan inhibitor ekstrak daun alpukat 50 ppm dilakukan dengan cara mengencerkan 50 mL larutan induk inhibitor dengan akuades hingga volume totalnya 1000 mL, kemudian dihomogenkan dan nilai keasamannya diukur menggunakan pH meter. Perlakuan yang sama dilakukan pada pembuatan larutan inhibitor ekstrak daun alpukat dengan konsentrasi 150, 250, dan 350 ppm.

Gugus fungsi yang ingin diketahui dalam ekstrak daun alpukat dianalisis menggunakan spektrofotometri IR. Kemudian untuk mengetahui komponen senyawa kimia yang terdapat pada ekstrak daun alpukat dilakukan analisis menggunakan GC-MS (Suharso *et al.*, 2010).

3.3.1.2. Pembuatan asap cair dari cangkang kelapa sawit

Penelitian ini menggunakan asap cair yang didapatkan dari cangkang kelapa sawit melalui metode pirolisis. Pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit dilaksanakan di lingkungan Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Cangkang kelapa sawit yang telah didapatkan sudah berada dalam keadaan terpotong-potong kecil. Sampel cangkang kelapa sawit dimasukkan dalam reaktor pirolisis sebanyak 5 Kg. Penutup reaktor ditutup dengan rapat supaya tidak ada udara yang masuk dalam reaktor, proses dilanjutkan dengan cara pembakaran atau pemanasan cangkang kelapa sawit dalam reaktor pada suhu 250-330 °C pada waktu 6-7 jam. Reaktor pirolisis menghasilkan asap hasil pembakaran yang terjadi, dan asap akan mengalir dalam rangkaian kondensor menghasilkan tetesan hasil pirolisis yang disebut dengan asap cair yang akan tertampung dalam wadah. Asap cair yang dihasilkan berwarna coklat gelap. Asap cair yang dihasilkan dari proses pirolisis selanjutnya dilakukan analisa sifat fisiknya yaitu berupa berat jenis, kadar air, dan pH.

Asap cair yang digunakan oleh penelitian yaitu asap cair cangkang kelapa sawit. Asap cair cangkang kelapa sawit yang dihasilkan adalah asap cair yang telah melalui tiga kali proses kondensasi. Asap cair yang dihasilkan dari proses pirolisis murni yaitu asap cair yang masih terdapat air dan minyak di dalamnya. Selanjutnya asap cair disaring menggunakan kertas saring sampai tidak terdapat minyak dan air pada asap cair tersebut, sehingga asap cair dapat digunakan sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4). Kemudian 1 g atau setara dengan 1 mL asap cair cangkang kelapa sawit diencerkan dalam 1000 mL akuades dan menghasilkan larutan induk inhibitor asap cair 1000 ppm. Pembuatan inhibitor asap cair pada penelitian ini dilakukan dalam konsentrasi 250 ppm yang dilakukan dengan cara mengencerkan 250 mL larutan induk inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit dengan akuades hingga volume total 1000 mL dan dihomogenkan serta diukur nilai keasamannya menggunakan pH meter.

Gugus fungsi yang ingin diketahui dalam asap cair cangkang kelapa sawit dianalisis menggunakan spektrofotometri IR. Kemudian untuk mengetahui komponen senyawa kimia yang terdapat pada asap cair cangkang kelapa sawit dilakukan analisis menggunakan GC-MS (Suharso *et al.*, 2010).

3.3.1.3. Pembuatan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat

Pada penelitian ini digunakan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat. Campuran dibuat dengan cara mencampurkan 200 mL ekstrak daun alpukat dengan 200 mL asap cair cangkang kelapa sawit menggunakan perbandingan konsentrasi yang bervariasi. Perpaduan larutan inhibitor ekstrak daun alpukat dan asap cair cangkang kelapa sawit diuji keefektivitasnya dengan melakukan variasi pada konsentrasi campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dimana konsentrasi ekstrak daun alpukat dibuat bervariasi dan asap cair cangkang kelapa sawit dibuat tetap yang ditunjukkan oleh Tabel 2. Setiap campuran yang telah dibuat diuji efektivitasnya dalam penghambatan pertumbuhan kerak CaSO_4 .

Tabel 2. Perbandingan konsentrasi campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat

Perbandingan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit (A): Ekstrak daun alpukat (D) (A:D)	Konsentrasi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit (ppm)	Konsentrasi Ekstrak Daun Alpukat (ppm)
5:1	250	50
5:3	250	150
5:5	250	250
5:7	250	350

Uji efektivitas inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dilakukan pada larutan pertumbuhan yang dibuat dari larutan 0,050 M CaCl_2 dan larutan 0,050 M Na_2SO_4 . Perbandingan konsentrasi campuran yang memiliki efektivitas terbesar digunakan sebagai inhibitor kerak CaSO_4 pada

penelitian ini. Gugus fungsi yang ingin diketahui pada campuran inhibitor ini dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer IR, dan dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen senyawa kimianya (Suharso *et al.*, 2010).

3.3.2. Preparasi Bibit Kristal

Pembuatan bibit kristal pada penelitian ini dilakukan dengan melarutkan CaCl_2 anhidrat (larutan 1 M) sebanyak 55 g dan Na_2SO_4 (larutan 1 M) 71 g masing-masing dengan 500 mL akuades dan dimasukkan ke dalam gelas kimia. Larutan campuran kedua bahan tersebut dihomogenkan dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 90 °C selama 15 menit hingga didapatkan larutan mengendap sempurna. Endapan yang diperoleh dipisahkan dengan kertas saring. Kemudian endapan dicuci dengan akuades untuk menghilangkan sisa-sisa larutan induk dan kotoran lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3-4 jam. Proses pembuatan bibit kristal diulang beberapa kali sehingga didapatkan bibit kristal yang cukup untuk melakukan prosedur selanjutnya.

3.3.3. Pengujian Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat sebagai Inhibitor dalam Pertumbuhan Kristal CaSO_4

Pengujian campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat sebagai inhibitor dalam menghambat pembentukan kristal kalsium sulfat (CaSO_4) dengan metode *seeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

3.3.3.1. Penentuan laju pertumbuhan CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan yang berbeda dengan metode *seeded experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara melarutkan CaCl_2 anhidrat 0,050 M dan Na_2SO_4 0,050 M masing-masing dalam 200 mL akuades. Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet

(*spinbar*) selama ± 15 menit pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk menghomogenkan larutan. Kemudian larutan CaCl_2 $0,050\text{ M}$ dan larutan Na_2SO_4 $0,050\text{ M}$ dicampurkan dan diaduk menggunakan pengaduk magnet (*spinbar*) selama ± 15 menit pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ agar terbentuk kerak CaSO_4 dengan konsentrasi $0,025\text{ M}$ dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan CaSO_4 yang terbentuk dimasukkan ke dalam 6 gelas plastik yang berbeda dengan masing-masing berisi 50 mL larutan pertumbuhan dan ditambahkan $0,2\text{ g}$ bibit kristal. Setelah itu, diletakkan dalam *waterbath* pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dilakukan selama 15 menit pertama dan satu gelas diambil kemudian disaring menggunakan kertas saring yang telah ditimbang, dicuci dengan akuades, lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 3-4 jam. Botol selanjutnya diambil tiap 10 menit sekali hingga pada botol terakhir.

Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2SO_4 sebesar $0,075$; $0,100$; dan $0,150\text{ M}$ untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor sebesar $0,0375$; $0,050$; dan $0,0625\text{ M}$. Endapan yang didapat ditimbang, kemudian dilakukan analisis morfologi menggunakan SEM, analisis struktur menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel menggunakan PSA (Suharso *et al.*, 2010).

3.3.3.2. Penentuan laju pertumbuhan kristal CaSO_4 dengan penambahan inhibitor pada variasi konsentrasi larutan pertumbuhan yang berbeda dengan metode *seeded experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara melarutkan CaCl_2 anhidrat $0,050\text{ M}$ dan Na_2SO_4 $0,050\text{ M}$ yang masing-masing dalam 200 mL inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dengan perbandingan konsentrasi (5:7). Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet (*spinbar*) selama ± 15 menit pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk menghomogenkan larutan. Kemudian larutan CaCl_2 $0,050\text{ M}$ dan larutan Na_2SO_4 $0,050\text{ M}$ dicampurkan dan diaduk menggunakan pengaduk magnet

(*spinbar*) selama ± 15 menit pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ agar terbentuk kerak CaSO_4 dengan konsentrasi $0,025\text{ M}$ dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan pertumbuhan CaSO_4 yang terbentuk dimasukkan ke dalam 6 gelas plastik yang berbeda dengan masing-masing berisi 50 mL larutan pertumbuhan dan ditambahkan $0,2\text{ g}$ bibit kristal. Setelah itu, diletakkan dalam *waterbath* pada suhu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dilakukan selama 15 menit pertama dan satu gelas diambil kemudian disaring menggunakan kertas saring yang telah ditimbang, dicuci dengan akuades, lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 3-4 jam. Botol selanjutnya diambil tiap 10 menit sekali hingga pada botol terakhir. Selanjutnya, endapan ditimbang untuk mengetahui berat kristal yang terbentuk.

Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2SO_4 sebesar $0,075$; $0,100$; dan $0,150\text{ M}$ serta variasi konsentrasi campuran inhibitor dengan perbandingan $5:1$; $5:3$; dan $5:5$ untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak CaSO_4 penambahan inhibitor sebesar $0,0375$; $0,050$; dan $0,0625\text{ M}$.

Endapan yang didapat ditimbang, kemudian dilakukan analisis morfologi menggunakan SEM, analisis struktur menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel menggunakan PSA (Suharso *et al.*, 2010).

3.3.4. Analisa Data

Data yang diperoleh berupa jumlah endapan terhadap waktu dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi inhibitor, masing-masing akan diplot sebagai jumlah endapan terhadap waktu menggunakan *Microsoft Excel 2011*. Untuk mengetahui efektivitas inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dalam menghambat laju pertumbuhan kerak CaSO_4 dengan menggunakan Persamaan 1 (Suharso *et al.*, 2019).

$$\% \text{ efektivitas inhibitor} = \frac{(C_a - C_b)}{C_0 - C_b} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

C_a = berat endapan dengan penambahan inhibitor pada saat kesetimbangan (g/L)

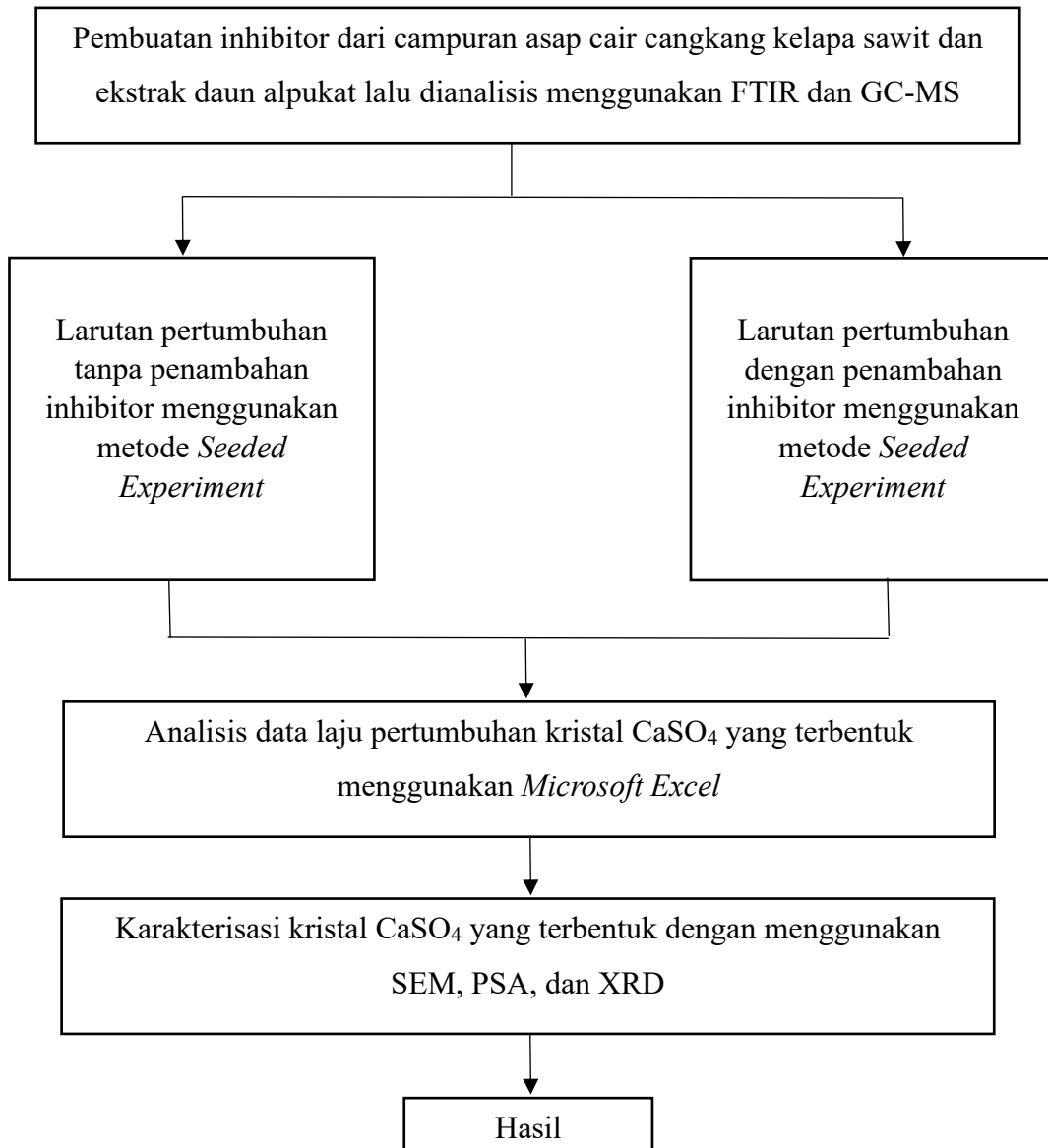
C_b = berat endapan tanpa penambahan inhibitor pada saat kesetimbangan (g/L)

C_0 = berat endapan awal (g/L)

Morfologi kerak CaSO_4 sebelum atau sesudah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan SEM. Perubahan ukuran partikel dari kelimpahan CaSO_4 pada masing-masing endapan dari setiap percobaan yang dilakukan juga dianalisis dengan PSA. Struktur kristal CaSO_4 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis dengan XRD.

3.3.5. Diagram Alir

Secara keseluruhan, rangkaian alur penelitian ini dapat diilustrasikan melalui diagram penelitian yang terlihat dalam Gambar 9.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dapat digunakan sebagai inhibitor untuk menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) yang ditunjukkan dengan perbedaan morfologi, fase kristal, dan ukuran partikel kerak CaSO_4 .
2. Presentase efektivitas tertinggi diperoleh pada konsentrasi larutan pertumbuhan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) 0,025 M dengan menggunakan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat (5:7) yang menunjukkan hasil presentase sebesar 82,19%.
3. Analisis morfologi permukaan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) menggunakan SEM menunjukkan terjadinya perubahan morfologi permukaan kerak. Tanpa penambahan inhibitor, kerak terlihat besar, dan lebar. Sedangkan dengan penambahan inhibitor kerak menjadi berukuran kecil.
4. Analisis fasa kristal kalsium sulfat (CaSO_4) menggunakan XRD menunjukkan adanya perbedaan fasa pada saat tanpa penambahan inhibitor yang didominasi dengan fasa gipsum dan basanit, dan dengan penambahan inhibitor fasa gipsum mulai menghilang dan didominasi oleh fasa basanit, serta terdapat fasa baru yaitu fasa anhidrit.
5. Analisis kerak kalsium sulfat (CaSO_4) menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel kerak kalsium sulfat

(CaSO₄) mengalami penurunan nilai rata-rata dan nilai tengah setelah ditambahkan inhibitor campuran AD (5:7).

5.2. Saran

Untuk meningkatkan mutu penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan saran agar dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap jenis kerak lain menggunakan inhibitor campuran asap cair cangkang kelapa sawit dan ekstrak daun alpukat dengan menambah variasi konsentrasi inhibitor dengan metode yang berbeda yakni tanpa penambahan bibit kristal (*unseeded experiment*).

DAFTAR PUSTAKA

- Alida, R., dan Fandra, P. 2018. Penanggulangan Scale CaCO_3 pada Sumur Lapangan 26 di PT. Pertamina Eps Asset 2 Field Limau. *Jurnal Teknik Patra Akademika*. 09(02).
- Ardilla, D., Thamrin, WS, B., dan Eddiyanto. 2013. Kajian Kandungan Senyawa Phenol dan Senyawa pada Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit (Accks) Redestilasi yang Dihasilkan pada Temperatur Tinggi. *Jurnal Agrium*. 18(1) : 7–13.
- Arifin, B., dan Ibrahim, S. 2018. Struktur, Bioaktivitas dan Antioksidan Flavonoid. *Jurnal Zarah*. 6(1) : 21–29.
- Azzahra, F., Almalik, E. A., dan Sari. A. A. 2019. Uji Aktivitas Antibakteri dan Ekstrak Etanol Daun Alpukat (*Persea americana* Mill.) Terhadap Bakteri *Salmonella typhi* dan *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Akfarindo*. 4(2) : 1-10.
- Azzahra, F., dan Budiati, T. 2022. Pengaruh Metode Pengeringan dan Pelarut Ekstraksi Terhadap Rendemen dan Kandungan Kimia Ekstrak Daun Alpukat (*Persea Americana* Mill.). *Medical Sains*. 7(1).
- Bancin, S. G., Utama, A. R. I., dan Darus, L. 2021. Pengaruh Variasi Waktu dan Jenis Limbah Padat Kelapa Sawit pada Pirolisis Menjadi Asap Cair. *E-Proceeding of Engineering*. 8(5). 5822.
- Bayuseno, A. P., Sutrisno., dan Muryanto, S. 2013. Pengaruh Temperatur Terhadap Pembentukan Kerak Gypsum Dalam Pipa. *Jurnal Gema Teknologi*. 16(4). 183-187.
- Dera, N. S. 2018. Pengaruh pH Larutan Terhadap Nukleasi dan Pertumbuhan Kristal Barium Sulfat di Dalam Pipa Beraliran Laminar : Pengamatan Kristal Menggunakan SEM-EDX dan XRD. *Journal of Infrastructure & Science Engineering*. 1(2) : 1–45.
- Fitriani, F., Wildan, M. W., dan Rachman, R. A. 2024. Analisis Ukuran Partikel Nanosilica pada Proses Alkali Fusion Silica Scaling Geotermal Dieng Menggunakan KOH. *Journal of Mechanical Engineering*. 1(1).
- Gifari, A., Aliyah, S., Ma'arif, S., dan Ardiatma, D. 2022. Analisis Pelunakan Air (Water Softening) dengan Metode Demineralisasi di PT. DMC

- Teknologi Indonesia Jababeka 2 Cikarang. *Sains dan Teknologi*. 1(1) : 387–396.
- Haji, A. G. 2013. Komponen Kimia Asap Cair Hasil Pirolisis Limbah Padat Kelapa Sawit. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. 9(3) : 109–116.
- Hartati, S., Yunus, A., Nandariyah, N., Yuniastuti, E., Pujiasmanto, B., Purwanto, E., Samanhudi, S., Sulandjari, S., Ratriyanto, A., Prastowo, S., Manurung, I. R., Suryanti, V., Susilowati, A., Artanti, A. N., Mulyani, S., dan Dirgahayu, P. 2022. Diversifikasi Tanaman Pekarangan Dengan Tanaman Alpukat Untuk Meningkatkan Gizi Keluarga. *SEMAR (Jurnal Ilmu Pengetahuan, Teknologi daan Seni Bagi Masyarakat*. 11(2) : 161.
- Hulungo, C., Wenas, D., dan Rondonuwu, A. 2022. Identifikasi Komposisi Mineral Batuan Teralterasi Menggunakan Spektroskopi SEM-EDX dan FTIR pada Daerah Menifestasi Panas Bumi di Desa Mototompiaan Kecamatan Modayag Kabupaten Bolaang Mongondow Timur. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*. 3(1) : 8–12.
- Husna, U. Z., Elraies, K. A., Shuhili, J. A. B. M., and Elryes, A. A. 2022. A Review: The Utilization Potency of Biopolymer as an Eco-Friendly Scale Inhibitors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 12(4) : 1075–1094.
- Kombongkila, O., Taunaumang, H., dan Tumimomor, F. 2024. Analisis Struktur Film Tipis Disperse Orange-3 Hasil FTIR. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*. 5(1) : 45–50.
- Margareta, M. A. H., dan Wonorahardjo, S. 2023. Optimasi Metode Penetapan Senyawa Eugenol dalam Minyak Cengkeh Menggunakan Gas Chromatography – Mass Spectrum dengan Variasi Suhu Injeksi. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*. 6(2) : 95–103.
- Muhammad, N. R. N., Dewi, E., dan Junaidi, R. 2023. Pemanfaatan Fly Ash dari Sisa Pembakaran Batubara PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang dalam Pembuatan Silika Gel sebagai Adsorben Limbah Zat Warna Methylene Blue. *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 7(3) : 21917–21924.
- Muqowwiyah, L. Z., dan Dewi, R.K. 2021. Potensi Ekstrak Daun Alpukat sebagai Anti Kolesterol. *Jurnal Tadris IPA Indonesia*. 1(3) : 403–412.
- Muryanto, S., Ma'mun, H., dan Bayuseno, A. P. 2013. Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) di Dalam Pipa Beraliran Laminer pada Laju Alir 30mL/menit Hingga 50mL/menit dan Penambahan Aditif Asam Malat. *Prosiding SNST ke-4*. 100–106.
- Nurfirzatulloh, I., Suherti, I., Insani, M., Shafira, R. A., dan Abriyani, E. 2023. Literature Review Article: Identifikasi Gugus Fungsi Tanin Pada Beberapa

- Tumbuhan Dengan Instrumen FTIR. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, Februari. 9(4) : 201–209.
- Oktaviyani, A. S. 2024. Studi Penambahan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode Seeded Experiment. *Skripsi*.
- Oramahi, H. A., Rusmmiyanto, E., dan Kustiati. 2021. Penggunaan Asap Cair dari Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Pengendalian Jamur *Phytophthora citrophthora* Secara In Vitro. *Majalah Ilmiah Biologi Biosfera: A Scientific Journal*. 38 (1):34-38.
- Panjinugroho, F. D. 2016. *Pengaruh Temperatur dan Zat Aditif Asam Sitrat 20 ppm pada Pembentukan Kristal CaSO_4 (Kalsium Sulfat)*. Tugas Akhir. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Pua, F. L., Zakaria, S., Chia, C. H., Fan, P. S., Rosenau, T., Potthast, A., dan Liebner, F. 2013. Solvolytic Liquefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Fibres: Analysis of Product Fractions Using FTIR and Pyrolysis-GCMS. *Sains Malaysiana*. 42 (6): 793-799.
- Putri, A. D., Elisa, N., Advitasari, Y. D., Sari, W. K., Pratiwi, M. E., Tobi, C. H. B., dan Murti, B. T. 2024. Efek In Vitro dan In Vivo Ekstrak Etanol *Persea Americana* Sebagai Antihipertensi dan Antioksidan pada Tikus yang Diinduksi Prednison. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia*. 11(2): 313-325.
- Raharjo, S. 2020. *Pembentukan dan Pengendalian Kerak Mineral di Dalam Pipa*. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Rahmadina, E., Nurjanah, S., Nurhadi, B., Muhaemin, M., dan Widyasanti, A. 2020. *Penggandaan Skala Proses Pengadukan Terhadap Rendemen Patchouli Alcohol pada Kristalisasi Minyak Nilam*. Prosiding Seminar Nasional Agribisnis. Universitas Padjajaran. Bandung.
- Rahmania, Y. 2012. *Studi Pendahuluan Ekstrak Kulit Kakao (Theobroma Cacao L.) dan Nalco 72990 Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3)*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Rahmawati, D. I., dan Nuraliyah, A. 2024. Pengaruh Ketahanan Korosi Logam Alumunium Terhadap Variasi pada Larutan Asam Klorida 0,1 M dan 0,5 M. *Dynamics in Engineering Systems : Innovations and Applications*. 1(1) : 15–27.
- Salimin, Z., dan Gunandjar. 2007. *Penggunaan EDTA Sebagai Pencegah Timbulnya Kerak pada Evaporasi Limbah Radioaktif Cair*. Prosiding PPI-PDIPTN. Yogyakarta.

- Sampepana, E., dan Fauziati. 2021. Kajian Karakteristik Kimia Asap Cair Cangkang Sawit, Tandan Kosong Sawit sebagai Bahan Antibakteri dan Aplikasinya. *Jurnal Riset Teknologi Industri*. 15(2) : 338–347.
- Sari, Y. P., Samharinto, dan Langai, B. F. 2018. Penggunaan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Sebagai Pestisida Nabati untuk Mengendalikan Hama Perusak Daun Tanaman Sawi (*Brassica juncea* L.). *Enviro Scientiae*. 14(3) : 272–284.
- Sarwendah, M., Wahyuni, T., dan Nindya Arisanti, T. 2019. Pemanfaatan Limbah Komoditas Perkebunan Untuk Pembuatan Asap Cair. *Jurnal Littri*. 25(1) : 22–30.
- Sedik, A., Lerari, D., Salci, A., Athmani, S., Bachari, K., Gecibesler, H., and Solmaz, R. 2020. Dardagan Fruit Extract as Eco-Friendly Corrosion Inhibitor For Mild Steel in 1 M HCl : Electrochemical and Surface Morphological Studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 107 : 189–200.
- Siregar, R. F. P., Misran, E., dan Cahyadi, I. T. 2019. Proses Ekstraksi Asam Asetat dari Distilat Asap Cair Tempurung Kelapa Menggunakan Pelarut Etil Asetat. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 8(2): 90-98.
- Sudarmaji, A. T., dan Hadi, S. 2021. Pengaruh Penambahan Larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Terhadap Pembentukan Kerak pada Penguapan Nira Tebu. *Jurnal Teknologi Separasi*. 7(2) : 634–641.
- Suharso. 2012. Characterization of Surface of the (100) Face of Borax Crystals using Atomic Force Microscopy (AFM): Dislocation Source Structure and Growth Hillocks. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung*. 3(2).
- Suharso., Buhani., dan Aprilia, L. 2014. Influence of Calix [4] Arene Derived Compound on Calcium Sulphate Scale Formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26(18) : 6155-6158.
- Suharso., Buhani., dan Suhartati, T. 2009. Peranan C-Metil-4,10,16,22-Tetrametoksi Caliks[4]Arena Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Indonesian Journal of Chemistry*. 9(2) : 206-210.
- Suharso., Buhani., Bahri, S., and Endrayanto, T. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as a Green Inhibitor of Calcium Sulfate (CaSO_4) Scale Formation. *Asian Journal of Research Chemistry*. 3(1) : 183-187.
- Suharso, Buhani, Tati, S., Liza, A., 2007. *Sintesis C-Metil-4,10,16,22-Tetrametoksi Kaliks[4]Arena dan Peranannya Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3)*. Laporan Akhir Program Insentif. Lembaga Penelitian Unila. Bandar Lampung.

- Suharso., Buhani., Utari, H. R., Tugiyono, and Satria, H. 2019. Influence of Gambier Extract Modification as Inhibitor of Calcium Sulfate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169 : 22-28.
- Suharso., Chandra, N. M., Kiswandono, A. A., Tugiyono, and Buhani. 2022. Extract of Mangosteen Peel (*Garcinia mangostana* L.) as Calcium Carbonate Scale Inhibitor. *RASAYAN*. 15(3) : 1799-1805.
- Suharso dan Buhani. 2015. *Penanggulangan Kerak Edisi 2*. Graha Ilmu. Bandar Lampung.
- Suharso., Padli, M., Tugiyono, and Buhani. 2021. Combination of Gambier Extract and Benzoic Acid as Inhibitor of Calcium Sulfate Scale Formation. *Resayan Journal of Chemistry*. 14(1) : 141-148.
- Suharso., Reno, T., Endaryanto, T., and Buhani. 2017. Modification of Gambier Extracts as Green Inhibitor of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Journal of Water Process Engineering*. 18 : 1-6.
- Sundjono dan Saefudin. (2014). Pengaruh Temperatur dan Ph Air Sadah Kalsium Sulfat Terhadap Korosi pada Baja Karbon. *Majalah Metalurgi*. 29(1) : 41-50.
- Susilowati, S., Aqil, U., Giritama Wibowo, H., dan Karaman, N. 2024. Pengaruh Pengadukan dan Konsentrasi ZnCl_2 pada Pembentukan Kristal Barium Sulfat dengan Metode Batch Kristalisasi. *Inovasi Teknik Kimia*. 9(2) : 92–97.
- Utami, Y. P., Matelda, A. D. K., dan Imrawati. 2022. Optimasi Waktu Penyulingan Terhadap Kadar dan Karakteristik Minyak Atsiri Daun Patikala (*Etlintera elatior* (Jack)). *Jurnal Katalisator*. 7(2) : 205–212.
- Wahdina., Hasan. A. O., dan farah, D. 2010. Efikasi Asap Cair dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dalam Penekanan Perkembangan Jamur *Aspergillus niger*. *Jurnal HPT Tropika*. 10(2) : 146-153.
- Woesono, H. B. 2011. Studi Pembuatan Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) dengan Cangkang Kelapa (*Cococs nucifera* Linn). *Agroteknose*. 5(1) : 9–17.
- Yanti, R. N., Ratnaningsih, A. T., dan Ikhsani, H. 2022. Pembuatan Bio-Briket dari Produk Pirolisis Biochar Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Ilmiah Pertanian*. 19(1) : 11–18.