

**STUDI PENAMBAHAN ASAP CAIR TANDAN KOSONG KELAPA  
SAWIT SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIUM SULFAT ( $\text{CaSO}_4$ )  
MENGUNAKAN METODE *SEDED EXPERIMENT***

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Nurdiana  
2017011099**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRAK

### STUDI PENAMBAHAN ASAP CAIR TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM SULFAT (CaSO<sub>4</sub>) MENGGUNAKAN METODE *SEDED EXPERIMENT*

Oleh

Nurdiana

Pembentukan kerak yang terjadi pada pipa industri terutama industri minyak dan gas, sering menjadi masalah yang serius karena dapat menghambat aliran fluida dan mengakibatkan kerugian. Salah satu jenis kerak yang sering ditemukan adalah kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>). Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan asap cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai inhibitor untuk menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) dengan menggunakan metode *seeded experiment*. Konsentrasi larutan pertumbuhan CaSO<sub>4</sub> yang digunakan pada penelitian ini yaitu 0,038 M, 0,050 M, 0,063 M, dan 0,075 M, serta variasi konsentrasi inhibitor 75, 100, 125, dan 150 ppm. Efektivitas inhibitor terbaik dalam menghambat pertumbuhan kerak CaSO<sub>4</sub> diperoleh dengan penambahan inhibitor pada konsentrasi 150 ppm dan larutan pertumbuhan 0,038 M, dengan persentase efektivitas sebesar 50,82%. Hasil analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) setelah penambahan inhibitor menunjukkan terjadi perubahan morfologi kerak CaSO<sub>4</sub> menjadi berukuran lebih kecil dan pendek dibandingkan tanpa penambahan inhibitor yang berukuran besar, lebar, dan berbentuk lebih panjang. Analisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan kerak CaSO<sub>4</sub> tanpa inhibitor terdiri dari fase gipsum dan basanit, sedangkan setelah penambahan inhibitor terdiri dari fase gipsum dan basanit serta muncul fase baru yaitu anhidrit. Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan terjadi penurunan ukuran partikel kerak CaSO<sub>4</sub> berdasarkan nilai rata-rata (*mean*) dan nilai tengah (*median*) setelah dilakukan penambahan inhibitor. Dengan demikian, asap cair tandan kosong kelapa sawit dapat digunakan untuk menghambat pertumbuhan kerak CaSO<sub>4</sub>.

Kata kunci: tandan kosong kelapa sawit, CaSO<sub>4</sub>, kerak, inhibitor

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF ADDITIONAL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES LIQUID SMOKE AS CALCIUM SULFATE (CaSO<sub>4</sub>) SCALE INHIBITOR USING SEEDED EXPERIMENT METHOD**

**By**

**Nurdiana**

The formation of scale on industrial pipes, especially in the oil and gas industry, is often becomes a serious problem because it can obstruct fluid flow and cause losses. One type of scale commonly found is calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>) scale. Therefore, in this research, liquid smoke from Palm Empty Fruit Bunches (EFB) was used as an inhibitor to inhibit the growth of calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>) scales using the seeded experiment method. The concentrations of the CaSO<sub>4</sub> growth solution used in this research were 0,038 M; 0,050 M; 0,063 M; and 0,075 M, with variations in inhibitor concentrations at 75, 100, 125, and 150 ppm. The best inhibitor effectiveness in inhibiting the growth of CaSO<sub>4</sub> scale was achieved with the addition of inhibitor at a concentration of 150 ppm and growth solution at 0,038 M, with an effectiveness percentage of 50,82%. Analysis results using Scanning Electron Microscopy (SEM) after the addition of the inhibitor showed a change in the morphology of CaSO<sub>4</sub> scale to smaller and shorter sizes compared to without the inhibitor, which was larger, wider, and longer. Analysis using X-Ray Diffraction (XRD) showed that CaSO<sub>4</sub> scale without the inhibitor consisted of gypsum and bassanite phases, while after the addition of the inhibitor, it consisted of gypsum and bassanite phases along with a new phase, anhydrite. Analysis using Particle Size Analyzer (PSA) showed a reduction in the particle size of CaSO<sub>4</sub> scale based on the mean and median values after the addition of the inhibitor. Thus, liquid smoke from palm empty fruit bunches can be used to inhibit the growth of CaSO<sub>4</sub> scale.

Keyword: palm empty fruit bunches, CaSO<sub>4</sub>, scale, inhibitor

**STUDI PENAMBAHAN ASAP CAIR TANDAN KOSONG KELAPA  
SAWIT SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM SULFAT  
(CaSO<sub>4</sub>) MENGGUNAKAN METODE *SEDED EXPERIMENT***

**Oleh**

**NURDIANA**

**Skripsi**

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

**Pada**

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**



**Judul** : **STUDI PENAMBAHAN ASAP CAIR  
TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT  
SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM  
SULFAT (CaSO<sub>4</sub>) MENGGUNAKAN  
METODE SEEDED EXPERIMENT**

**Nama Mahasiswa** : **Nurdiana**

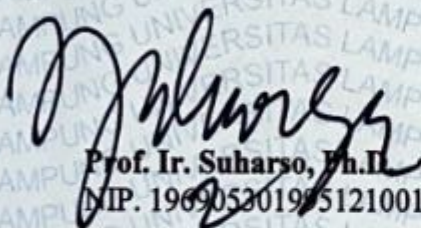
**Nomor Pokok Mahasiswa** : **2017011099**

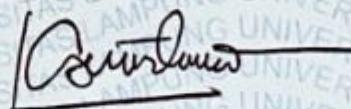
**Jurusan** : **Kimia**

**Fakultas** : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

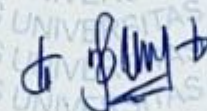


**1. Komisi Pembimbing**

  
**Prof. Ir. Suharso, Ph.D.**  
NIP. 196905301975121001

  
**Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.**  
NIP. 197007052005011003

**2. Ketua Jurusan KIMIA FMIPA**

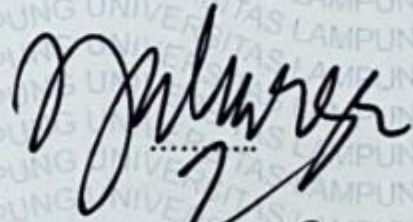
  
**Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197205302000032001



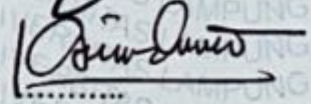
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Ir. Suharso, Ph.D.

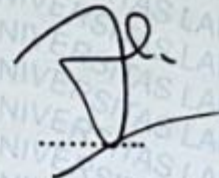


Sekretaris : Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.



Penguji

Bukan Pembimbing : Prof. Andi Setiawan, Ph.D.

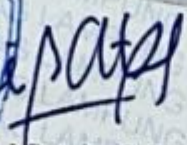


2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dekan, **Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.**

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 2 Agustus 2024



## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nurdiana

NPM : 2017011099

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Studi Penambahan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*”** adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 8 Agustus 2024  
Yang Menyatakan,



Nurdiana  
NPM. 2017011099

## RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama lengkap Nurdiana, lahir di Mesuji pada tanggal 27 Desember 2001. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Jimin dan Ibu Melda. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 1 Sinar Laga pada tahun 2013. Kemudian, melanjutkan pendidikan ke MTs SA Tri Bhakti Al-Husna hingga tahun 2016. Penulis menamatkan pendidikan sekolah menengah atas di MAN 1 Metro pada tahun 2019. Selanjutnya, penulis diterima di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2020.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi intra kampus seperti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) menjabat sebagai anggota Biro Usaha Mandiri (BUM) pada Periode 2021-2022 dan 2022-2023. Lalu, Rohani Islam (ROIS) menjabat sebagai anggota Bidang Informasi dan Komunikasi pada Periode 2021-2022. Pada bulan Juni-Agustus 2023 penulis telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. PLN Nusantara Power UPK Sebalang. Selain itu, pada tahun 2023 penulis juga telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Negara Harja, Kecamatan Pakuan Ratu, Kabupaten Way Kanan sebagai bentuk pengabdian kepada masyarakat. Pada tahun 2024 penulis menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Lampung dengan judul "Studi Penambahan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*".



## MOTTO

*"Bekerjalah seperti segala sesuatu tergantung pada usahamu,  
dan berdo'alah seperti segala sesuatu tergantung pada Allah  
SWT"*

**It's okay to have a different path**

Everything has a place and time

**"Dan mintalah pertolongan dengan sabar dan sholat"  
(Q.S Al Baqarah: 45)**

***"Aku menyerahkan urusanku kepada Allah. Sungguh, Allah Maha Melihat  
akan hamba-hamba-Nya"  
(Q.S Ghafir: 44)***

*"Apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa  
yang ditakdirkan untukku tidak akan pernah melewatkanmu"  
Umar bin Khattab*

**"Apabila sesuatu yang kau senangi tidak terjadi maka senangilah  
apa yang terjadi"  
Ali bin Abi Thalib**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Alhamdulillahilahi rabbil 'alamin*

*Puji Syukur atas kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya yang selalu menyertai setiap langkahku, sehingga terciptalah sebuah karya yang ku persembahkan sebagai wujud bakti dan tanggung jawabku kepada:*

*Kedua orang tuaku yang aku sayangi, Bapak Jimin dan Ibu Melda yang senantiasa mendo'akan, mendukung, dan memberikan kasih sayang tanpa henti. Semoga Allah SWT hadiahkan Jannah-Nya untukmu, Aamiin yaa Robbal alamin*

*Dengan rasa hormat kepada Prof. Suharso, Ph.D., Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., dan Prof. Andi Setiawan, Ph.D. Terima kasih atas bimbingan, nasihat, dan ilmu yang telah diberikan selama ini*

*Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas dedikasi, ilmu, dan bimbingan yang tak ternilai harganya*

*Keluarga besar dan sahabat-sahabatku yang memberikan dukungan moral dan spiritual. Terima kasih atas segala do'a dan motivasinya*

*Serta,*

*Almamaterku tercinta, Universitas Lampung*

## SANWACANA

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya. Sholawat beriring salam senantiasa kita sanjung agungkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang senantiasa diharapkan syafa'atnya hingga hari kiamat kelak, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

**“Studi Penambahan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*”**

Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis banyak menerima bantuan, bimbingan, kritik, saran, dan semangat dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Jimin dan Ibu Melda yang selalu memberikan dukungan dan do'a, kasih sayang yang tulus, serta usahanya dalam memberikan yang terbaik kepada penulis. Semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan, kesehatan, rezeki, kebahagiaan dunia akhirat, dan



umur yang panjang sehingga dapat selalu bersama dalam suka maupun duka yang akan datang.

2. Mbah Kakung, Mbah Uti, dan keluarga besar penulis yang selalu mendukung dan mendo'akan penulis. Semoga Allah SWT selalu memberikan kesehatan, rezeki, kebahagiaan dunia akhirat, dan umur yang panjang.
3. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph. D. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan ilmu, arahan, motivasi, kritik, dan saran kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik. Semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan dan keberkahan atas semua kebaikan yang telah Bapak berikan.
4. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Kedua terima kasih atas segala bimbingan, kritik, saran, nasihat, serta ilmu yang bermanfaat sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan ridho-Nya dan membalas segala kebaikan Bapak.
5. Bapak Prof. Andi Setiawan, Ph.D. selaku Dosen Pembahas, penulis ucapkan terima kasih atas kritik, saran, dan ilmu yang telah diberikan, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga Allah SWT selalu memberikan keberkahan atas semua kebaikan yang telah Bapak berikan.
6. Ibu Dr. Rinawati, Ph.D, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing, memberikan arahan, bantuan, dan dukungan kepada penulis selama menjalani 4 tahun masa studi di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Semoga Allah SWT selalu memberikan keberkahan atas semua kebaikan yang telah Ibu berikan.
7. Ibu Mita Rilyanti, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah membantu dalam segala hal terkait administrasi dan menyetujui laporan skripsi ini.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak Mulyono, Ph.D. selaku Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kerja Sama FMIPA Universitas Lampung.

10. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu yang tak ternilai harganya, pengalaman yang sangat berharga dan bermanfaat, serta motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswi jurusan kimia.
11. Mbak Liza Apriliya, S.Si. selaku Laboran Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik yang telah banyak membantu penulis atas penyediaan alat di laboratorium selama penelitian ini berlangsung dan kemudahan dalam mengurus berkas. Semoga kebaikannya selalu diberkahi Allah SWT.
12. Aulia Zahro Kholili sahabat sejak masih bersekolah di MAN 1 Metro hingga saat ini. Terima kasih telah menjadi *partner* satu asrama dan satu kos yang super baik, selalu memberikan dukungan, semangat, dan tempat berkeluh kesah. *I'm so grateful to have you in my life.*
13. Luthfi Qolbi Azzahra (Bubut) dan Fajar Fitriyana sahabat sejak masih di asrama MAN 1 Metro sampai sekarang. Terima kasih untuk kebersamaannya selama ini, selalu memberikan dukungan, kepedulian, menjadi tempat berkeluh kesah dan bahagia bersama, namun saat ini kita dipisahkan oleh jarak ratusan KM itu. *Thank you for always being there for me, no matter what.*
14. Sahabat-sahabat “Yana’s Geng” alias *Mine* Bubut, Gembel, Suru, Sus, Peu, dan Yanasoo, terima kasih telah menjadi sahabat-sahabat semasa di asrama MAN 1 Metro, yang selalu memberikan dukungan, bantuan, motivasi, semangat, dan selalu ada baik suka maupun duka. *Thank you for being my friends, in good times and bad.*
15. Sahabat-sahabat “Dadakan” Aya, Avi, Carlos, Depa, Maria, Step, dan Rahmad, terima kasih atas kebersamaan, bantuan, dan dukungannya selama masa perkuliahan *offline* sampai dengan penyelesaian skripsi ini. *Thank you for being such a great bestfriend. I'm grateful for your kindness and support.*
16. Leoni, Anin, seluruh sobat Biokim, terima kasih atas dukungan, bantuan, dan kebersamaan yang kalian berikan. *So glad we're friends.*
17. Rekan seperjuangan “Les Organik” Anggun, Avi, Cikal, Dian, Muti, Rahmad, Ratih, dan Ribka, terima kasih telah berjuang sampai sekarang. Kalian Hebat!

18. Rekan seperjuangan *Suharso's Research 2020* Fara, Sarah, dan Tyas, terima kasih telah menjadi *partner* kerak terbaik yang selalu ada baik dalam suka maupun duka, memberikan dukungan, semangat, serta bantuan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini hingga akhir. Semoga kita semua selalu diberikan kelancaran dan kesuksesan kedepannya. *Good Luck Girls!*
19. Kakak-kakak senior *scale* Kak Nurul, Kak Alyaa, Kak Maudi, dan Kak Novani, terima kasih atas segala kebaikan dan ilmunya yang telah diberikan kepada penulis.
20. Seluruh teman-teman di Laboratorium Kimia Anorgank/Fisik atas bantuan dan dukungannya.
21. Teman-teman kelas B Kimia 2020 yang telah menemani masa-masa perkuliahan dari daring (*online*) sampai luring (*offline*).
22. Keluarga besar Kimia angkatan 2020 yang tidak dapat disebutkan satu per-satu, terima kasih atas bantuan serta dukungannya. Semoga selalu diberikan kelancaran dan kesuksesan kedepannya.
23. *Partner* KKN Desa Negara Harja, Aji, Budi, Ajeng, Anna, dan Leni, terima kasih untuk kebersamaan dan kekeluargaan selama 40 harinya.
24. Almamater tercinta yaitu Universitas Lampung.
25. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per-satu yang telah memberikan dukungan, do'a, nasihat, dan bimbingan dalam penulisan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan skripsi ini. Namun, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Bandar Lampung, 8 Agustus 2024  
Penulis,



Nurdiana



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>v</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	4
1.3 Manfaat Penelitian .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Kerak .....	6
2.2 Mekanisme Pembentukan Kerak .....	7
2.3 Faktor Pembentukan Kerak .....	8
2.4 Kalsium Sulfat (CaSO <sub>4</sub> ) .....	11
2.5 Metode Pencegahan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO <sub>4</sub> ) .....	12
2.6 Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit .....	14
2.7 Metode <i>Seeded Experiment</i> .....	17
2.8 Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat (CaSO <sub>4</sub> ) .....	18
2.8.1 Spektrofotometer <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR) .....	18
2.8.2 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS) .....	19
2.8.3 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	20
2.8.4 <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA) .....	21
2.8.5 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	22
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>24</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	24
3.2 Alat dan Bahan .....	24

3.3	Prosedur Penelitian .....	25
3.3.1	Pembuatan Asap Cair .....	25
3.3.2	Pembuatan Inhibitor dari Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Variasi Konsentrasi .....	25
3.3.3	Pembuatan Bibit Kristal .....	26
3.3.4	Pengujian Inhibitor Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit dalam Pembentukan Kristal Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) .....	26
3.3.5	Analisis Data .....	29
3.3.6	Diagram Alir Penelitian .....	30
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>31</b>
4.1	Pembuatan dan Analisis Inhibitor Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) .....	31
4.2	Uji Ketahanan Inhibitor Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit .....	32
4.3	Perbandingan Larutan Pertumbuhan Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) .....	33
4.4	Analisis Inhibitor Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Spektrofotometer Inframerah (IR) .....	35
4.5	Analisis Komponen Senyawa Kimia Pada Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i> (GC-MS) .....	37
4.6	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ Tanpa Penambahan Inhibitor pada Beberapa Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Seeded Experiment</i> .....	39
4.7	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor pada Beberapa Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Seeded Experiment</i> .....	41
4.7.1	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Asap Cair TKKS pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,038 M .....	46
4.7.2	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Asap Cair TKKS pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,050 M .....	47
4.7.3	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Asap Cair TKKS pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,063 M .....	49
4.7.4	Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor Asap Cair TKKS pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,075 M .....	50
4.8	Analisis Permukaan Kerak $\text{CaSO}_4$ Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	53

4.9 Analisis Distribusi Ukuran Partikel CaSO <sub>4</sub> Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA).....	57
4.10 Analisis Struktur Kerak CaSO <sub>4</sub> dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	58
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>61</b>
5.1 Simpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>63</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>69</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kandungan kimia asap cair tandan kosong kelapa sawit.....	16
2. Daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsi.....	19
3. Gugus fungsi hasil analisis IR pada asap cair tandan kosong kelapa sawit.....	37
4. Komponen kimia tertinggi pada asap cair tandan kosong kelapa sawit..	38
5. Hasil GCMS kandungan kimia dalam asap cair tandan kosong kelapa sawit.....	38
6. pH inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit.....	41
7. pH larutan pertumbuhan sebelum dan setelah penambahan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit .....	42
8. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada variasi konsentrasi.....	45
9. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,038 M.....	47
10. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,050 M.....	48
11. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,063 M.....	50
12. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,075 M.....	51
13. Data persentase efektivitas inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit pada penambahan inhibitor 150 ppm .....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram temperatur-konsentrasi .....	10
2. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ( $\circ$ = inhibitor, $\diamond$ = bibit kristal).....	14
3. Tandan kosong kelapa sawit .....	14
4. Asap cair TKKS hasil pirolisis .....	17
5. Hasil uji GC-MS asap cair TKKS .....	20
6. Morfologi kerak $\text{CaSO}_4$ (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm .....	21
7. Distribusi ukuran partikel $\text{CaSO}_4$ .....	22
8. Pola XRD kristal $\text{CaSO}_4$ .....	23
9. Diagram Alir Penelitian .....	30
10. Pirolisis asap cair TKKS (a) reaktor pirolisis (b) asap cair TKKS .....	32
11. Larutan inhibitor asap cair TKKS (a) 75 ppm (b) 100 ppm (c) 125 ppm dan (d) 150 ppm setelah didiamkan selama 1 bulan.....	33
12. Perbandingan larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,038 M (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan inhibitor pada konsentrasi 150 ppm.....	34
13. Perbandingan larutan pertumbuhan $\text{CaSO}_4$ 0,025 M (a) tanpa inhibitor, (b) dengan EDTA, (c) dengan inhibitor TKKS .....	34
14. Perbandingan kerak $\text{CaSO}_4$ 0,038 M (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan inhibitor konsentrasi 150 ppm.....	35
15. Spektrum IR asap cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).....	36
16. Kromatogram asap cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).....	37
17. Grafik laju pertumbuhan kerak $\text{CaSO}_4$ tanpa inhibitor .....	40
18. Grafik laju pertumbuhan kerak $\text{CaSO}_4$ dengan penambahan inhibitor asap cair TKKS (a) 0,038 (b) 0,050 (c) 0,063 dan (d) 0,075 M .....	43

19. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO <sub>4</sub> 0,038 M dengan konsentrasi inhibitor 75, 100, 125, dan 150 ppm .....	46
20. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO <sub>4</sub> 0,050 M dengan konsentrasi inhibitor 75, 100, 125, dan 150 ppm .....	48
21. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO <sub>4</sub> 0,063 M dengan konsentrasi inhibitor 75, 100, 125, dan 150 ppm .....	49
22. Grafik laju pertumbuhan kristal CaSO <sub>4</sub> 0,075 M dengan konsentrasi inhibitor 75, 100, 125, dan 150 ppm .....	51
23. Morfologi kerak CaSO <sub>4</sub> pada konsentrasi 0,038 M dengan perbesaran 2500x (a) tanpa (b) dengan inhibitor asap cair TKKS 150 ppm .....	54
24. Morfologi kerak CaSO <sub>4</sub> pada konsentrasi 0,038 M dengan perbesaran 5000x (a) tanpa (b) dengan inhibitor asap cair TKKS 150 ppm .....	55
25. Distribusi ukuran partikel kerak CaSO <sub>4</sub> 0,038 M tanpa inhibitor dan dengan inhibitor asap cair TKKS 150 ppm .....	57
26. Pola XRD kerak CaSO <sub>4</sub> (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan inhibitor asap cair TKKS 150 ppm (G = gipsum, B = basanit, A = anhidrit) .....	59

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini, industri di Indonesia telah mengalami perkembangan yang cukup pesat. Sebagian besar industri menggunakan pipa dalam sistem kerjanya, salah satunya yakni industri minyak dan gas. Sistem perpipaan sering digunakan untuk mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat lain, sehingga memungkinkan distribusi fluida berlangsung dengan lancar (Ilmah *et al.*, 2024). Namun dalam proses industri tersebut sering mengalami masalah yang terjadi dalam sistem perpipaan yakni terbentuknya endapan yang disebut kerak (*scale*).

Kerak merupakan hasil pengendapan yang terbentuk ketika ion-ion mineral dalam air mengendap dan membentuk struktur kristal pada permukaan bagian dalam pipa dan peralatan penukar panas. Adapun faktor-faktor yang berpengaruh seperti perubahan komposisi ion, tingkat pH, tekanan, dan suhu dapat berperan dalam proses kimia pembentukan kerak. Ketika larutan mencapai titik jenuh, beberapa molekul bergabung membentuk inti kristal dan kristal yang terbentuk memiliki muatan ion yang lebih rendah serta cenderung menyatu sehingga dapat membentuk kerak. Kerak dapat terbentuk saat unsur-unsur penyusun kerak seperti natrium, kalsium, klorida, dan sulfat melampaui batas kelarutannya dalam kondisi supersaturasi. Bila konsentrasi unsur-unsur ini melebihi batas kelarutannya dalam air, kerak akan melekat pada permukaan dan akhirnya mengendap di dalam pipa (Sudarmaji dan Saroso, 2021; Raharjo, 2020).

Endapan kerak di dalam pipa dapat menimbulkan berbagai kerugian seperti penyempitan laju alir yang akan mengakibatkan pengurangan debit dan proses yang lebih lama sehingga akan memperbesar biaya produksi. Di samping itu, terjadi penebalan dinding pipa seperti pada dinding pipa air dalam boiler dimana proses pembakaran terjadi, sehingga akan menghambat proses perpindahan panas secara konduksi karena adanya lapisan kerak yang mengakibatkan hilangnya panas. Endapan kerak juga dapat mengurangi umur pakai peralatan dan mengakibatkan kegagalan peralatan yang seringkali memerlukan perbaikan atau penggantian. Kerak ini dapat meningkatkan biaya produksi dan perawatan perusahaan, karena harus dilakukan pembersihan dan penggantian pipa yang terkena kerak (Raharjo, 2020).

Kerak yang paling umum ditemukan pada peralatan industri minyak dan gas adalah kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) (Suharso dan Buhani, 2015). Pembentukan kerak tersebut menimbulkan kerugian yang tidak sedikit, salah satunya industri minyak terbesar di Indonesia, yaitu PT Pertamina *Gheothermal Energy* (PGE). Mereka mengeluarkan jumlah dana sekitar 6-7 juta dolar AS, atau setara dengan 80-100 miliar rupiah, untuk menggantikan pipa-pipa pada bagian geotermal setiap 10 tahun sekali, dimana hal ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan kerak yang ada (Suharso *et al.*, 2017).

Untuk menghadapi permasalahan ini, berbagai metode telah diupayakan untuk mengendalikan pertumbuhan endapan kerak. Salah satunya adalah dengan menurunkan pH larutan melalui penambahan asam. Namun, metode dengan menurunkan pH melalui penggunaan asam dapat meningkatkan tingkat korosi (Suharso *et al.*, 2015). Selain metode tersebut, pengendalian pembentukan kerak juga dapat dilakukan dengan pelunakan dan pembebasan mineral dalam air. Namun, penggunaan air bebas mineral dalam industri-industri besar memiliki kelemahan, yakni memerlukan biaya yang cukup tinggi (Halimatuddahlia, 2003).



Berdasarkan kekurangan yang ada pada beberapa metode sebelumnya, penting untuk mengembangkan metode yang lebih efektif dalam mengurangi laju pertumbuhan kerak. Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah penggunaan inhibitor kerak. Inhibitor adalah zat yang dapat digunakan untuk menjaga agar anion dan kation yang berperan dalam pembentukan kerak tetap larut dalam larutan, sehingga diharapkan pembentukan kerak tidak terjadi (Raharjo *et al.*, 2016). Salah satu prinsip dasar dari kinerja inhibitor kerak adalah pembentukan senyawa kompleks (*chelate*) antara inhibitor kerak dengan unsur-unsur pembentuk kerak. Hal ini mengakibatkan senyawa kompleks yang terbentuk menjadi larut dalam air, sehingga memungkinkan untuk mencegah pertumbuhan kristal (Suharso dan Buhani, 2011).

Pemanfaatan inhibitor kerak menjadi alternatif yang baik karena sifatnya yang ramah lingkungan, biaya rendah, dan dapat diperoleh dengan mudah. Berdasarkan penelitian sebelumnya, pertumbuhan kerak dapat dilakukan dengan penambahan inhibitor yang berasal dari tanaman di sekitar kita, seperti ekstrak tanaman gambir (*Uncaria gambir*) (Suharso *et al.*, 2010), ekstrak kulit manggis (*Garcinia mangostana L.*) (Suharso *et al.*, 2022), ekstrak kemenyan (*Styrax Benzoin Dryand*) (Suharso *et al.*, 2017), ekstrak daun sirih (Santoso *et al.*, 2019), dan asap cair tempurung kelapa (Suharso *et al.*, 2019).

Pada penelitian ini digunakan inhibitor yang berasal dari tanaman kelapa sawit. Tanaman kelapa sawit pada umumnya hanya digunakan untuk memproduksi minyak mentah kelapa sawit atau *Crude Palm Oil* (CPO), namun pada bagian tandan kosong kelapa sawit hanya menjadi limbah bagi pabrik kelapa sawit (Sari *et al.*, 2019). Tandan kosong kelapa sawit memiliki nilai tambah yang sangat berguna karena dapat diolah menjadi asap cair yang digunakan sebagai inhibitor untuk menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Komposisi asap cair yang dihasilkan dari pirolisis tandan kosong kelapa sawit terdiri dari berbagai senyawa, termasuk senyawa-senyawa fenolik, alkohol, asam-asam organik, dan karbonil (Sari *et al.*, 2018). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Riskawati *et al.*, (2022), asap cair tandan kosong kelapa sawit mengandung

berbagai jenis senyawa kimia dengan komponen paling melimpah berupa senyawa fenol sebanyak 68,15%. Senyawa fenol memiliki gugus OH yang memiliki kemampuan untuk berikatan dengan logam berat seperti  $\text{Ca}^{2+}$ . Adanya kandungan fenol yang cukup tinggi tersebut memungkinkan asap cair tandan kosong kelapa sawit untuk dikembangkan sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ).

Berdasarkan uraian diatas, maka penelitian ini dilakukan untuk melihat efektivitas penambahan asap cair tandan kosong kelapa sawit sebagai inhibitor dengan menggunakan metode *seeded experiment* pada pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Selanjutnya dilakukan analisis gugus fungsi inhibitor dengan menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dan untuk mengetahui komponen senyawa kimianya dianalisis menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*). Analisis dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$ , analisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kerak  $\text{CaSO}_4$ , sedangkan analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengukur distribusi ukuran partikelnya.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari pengaruh penggunaan asap cair tandan kosong kelapa sawit sebagai inhibitor pada berbagai konsentrasi terhadap pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ).
2. Mengetahui efektivitas asap cair tandan kosong kelapa sawit dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) dengan menggunakan metode *seeded experiment* melalui analisis data dan karakterisasi menggunakan SEM, PSA, dan XRD.

### **1.3 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi baru mengenai pemanfaatan penggunaan asap cair tandan kosong kelapa sawit sebagai inhibitor terhadap pencegahan pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) yang efektif, sehingga hasil penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mencegah terbentuknya kerak pada peralatan industri dan mengurangi dampak negatif yang terkait dengan masalah tersebut.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kerak

Kerak adalah tumpukan keras dari bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air yang biasa ditemui di industri minyak dan aliran fluida pada sistem industri lainnya (Raharjo, 2020). Kerak merupakan hasil pengendapan dari senyawa-senyawa anorganik yang mengendap dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Kristal-kristal yang terbentuk mempunyai muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga akan membentuk kerak (Sudarmaji dan Saroso, 2021).

Kerak dapat terbentuk karena adanya unsur-unsur pembentuk kerak seperti natrium, kalsium, klorida, dan sulfat yang melampaui batas kelarutannya pada kondisi supersaturasi. Apabila konsentrasi unsur-unsur tersebut melampaui batas kelarutannya dalam air, maka kerak akan menempel pada permukaan dan akhirnya menetap di dalam pipa (Raharjo, 2020). Kerak yang terbentuk pada sistem perpipaan, baik dalam konteks industri maupun rumah tangga mengakibatkan berbagai permasalahan teknis dan ekonomis yang serius. Fenomena ini terjadi karena kerak dapat menghalangi aliran air dalam pipa, menyebabkan penyumbatan, dan secara bersamaan menghambat efisiensi proses perpindahan panas dalam peralatan penukar panas. Akibatnya, lapisan kerak yang terbentuk di dalam pipa dapat menyebabkan pengecilan diameter pipa serta menghambat aliran fluida dalam sistem perpipaan tersebut (Shiddiq, 2014).

Komponen khas kerak yang sering dijumpai adalah kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ), kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), kalsium dan seng fosfat ( $\text{Ca}$  dan  $\text{Zn}_2(\text{PO}_4)$ ), kalsium fosfat ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)$ ), silika ( $\text{Si}$ ) dengan konsentrasi tinggi, besi dioksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), besi fosfat ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ), mangan dioksida ( $\text{MnO}_2$ ), dan magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) (Raharjo, 2020).

## 2.2 Mekanisme Pembentukan Kerak

Prinsip dari mekanisme pembentukan kerak (Suharso dan Buhani, 2015), yaitu:

1. Campuran dua air garam yang tidak sesuai (umumnya air formasi mengandung banyak kation seperti barium, kalsium, dan stronsium yang bercampur dengan sulfat dan banyak terdapat dalam air laut, menghasilkan kerak sulfat seperti  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$  atau  $\text{BaSO}_4$ ).
2. Penurunan tekanan dan kenaikan temperatur air garam, yang akan menurunkan kelarutan garam (umumnya mineral yang paling banyak mengendap adalah kerak karbonat seperti  $\text{CaCO}_3$  atau  $\text{MgCO}_3$ ).
3. Penguapan air garam, menghasilkan peningkatan konsentrasi garam melebihi batas kelarutan dan membentuk endapan garam.

Proses terbentuknya kerak dapat dibagi menjadi tiga tahapan pokok, yakni:

### 1. Tahap Pembentukan Inti Kristal (Nukleasi)

Pada tahap ini, partikel-partikel ion yang terdapat dalam suatu cairan akan membentuk inti kristal. Inti kristal yang terbentuk memiliki struktur yang sangat halus, sehingga tidak akan mengendap saat cairan mengalir.

Berdasarkan metode yang digunakan dalam proses pembentukan, pembentukan kristal dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu secara homogen (*homogenous nucleation*) dan heterogen (*heterogenous nucleation*) (Raharjo, 2020).

Tahap pertama dalam nukleasi homogen dimulai dengan pengelompokan ion-ion untuk membentuk inti kristal kecil. Inti kristal ini tumbuh melalui penambahan ion-ion yang menempel pada permukaan kristal yang tidak sempurna. Dengan demikian, ukuran kristal akan meningkat dan kristal yang



lebih besar mendukung pertumbuhan inti kristal yang lebih kecil sehingga menghasilkan pembentukan gugus (*cluster*) (Dera, 2018).

Proses pembentukan inti kristal heterogen terjadi akibat keberadaan partikel-partikel asing yang dapat memicu pembentukan inti kristal. Biasanya, nukleasi heterogen terjadi di area permukaan yang kasar pada pipa dan pada sambungan yang tidak sempurna pada saluran pipa. Kristal atau disebut juga nukleon yang terbentuk melalui nukleasi heterogen cenderung memiliki periode inisiasi yang lebih singkat ketika mereka mulai tumbuh dan melekat pada permukaan pipa atau pada kerak yang sudah ada sebelumnya (Dera, 2018).

## 2. Tahap Pertumbuhan Inti

Pada tahap pertumbuhan inti, kristal akan menarik molekul-molekul lain untuk bergabung sehingga inti tersebut akan berkembang menjadi butiran yang lebih besar, dengan diameter sekitar 0,001 hingga 0,1  $\mu$  (ukuran koloid). Kemudian, pertumbuhan kristal akan terus berlanjut hingga diameter kristal mencapai 0,1 hingga 10  $\mu$  (ukuran kristal halus). Ketika ukuran kristal tersebut telah mencapai lebih dari 10  $\mu$  (kristal kasar), kristal akan mulai mengendap (Aditya, 2019).

## 3. Tahap Pengendapan Kristal

Kristal kasar yang terbentuk dari proses pertumbuhan kristal selanjutnya akan mengendap. Kecepatan pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh ukuran kristal yang membesar pada tahap sebelumnya. Proses pembentukan juga dipengaruhi oleh aliran fluida pembawa, ketika kristal akan mengendap apabila kecepatan pengendapan lebih besar dari kecepatan aliran fluida (Aditya, 2019).

### 2.3 Faktor Pembentukan Kerak

Beberapa faktor utama yang berpengaruh terhadap pembentukan, pertumbuhan, dan pengendapan kerak antara lain adalah perubahan kondisi reservoir seperti

penurunan tekanan dan perubahan temperatur, campuran antara dua jenis air dengan susunan mineral yang tidak sesuai, terjadinya supersaturasi, pengadukan atau pengaruh dari turbulensi (agitasi), waktu kontak antara kerak dengan permukaan pipa, serta perubahan pH air. Peningkatan temperatur dapat mengakibatkan kecepatan reaksi dan tumbukan antara molekul yang semakin meningkat, sehingga terjadi peningkatan massa kerak yang terbentuk. Konsentrasi ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang meningkat juga akan mengakibatkan peningkatan jumlah ion mineral dalam larutan, sehingga jumlah tumbukan antara ion-ion mineral yang membentuk kerak akan semakin banyak (Raharjo, 2020).

Dapat diamati bahwa lapisan kerak terbentuk akibat dari akumulasi inti-inti kristal. Proses pembentukan kristal dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, di antaranya:

#### 1. Kristalisasi

Menurut Yulianto *et al.*, (2018), kristalisasi (*crystallization*) adalah proses dimana partikel-partikel zat padat (kristal) terbentuk dalam suatu fase yang seragam. Kristalisasi adalah metode praktis untuk memperoleh bahan kimia murni dalam kondisi yang ideal, baik untuk pengemasan maupun penyimpanan. Pada proses kristalisasi digunakan alat yang disebut *crystallizer*, yaitu alat yang digunakan untuk menghasilkan atau membentuk kristal dari larutan. Oleh karena itu, larutan yang akan mengalami kristalisasi harus dibuat lewat jenuh, biasanya melalui proses penguapan atau pendinginan. Kristalisasi hanya dapat terjadi setelah terjadi kondisi supersaturasi, dimana untuk mencapai keadaan ini bergantung pada tingkat kelarutan zat tersebut.

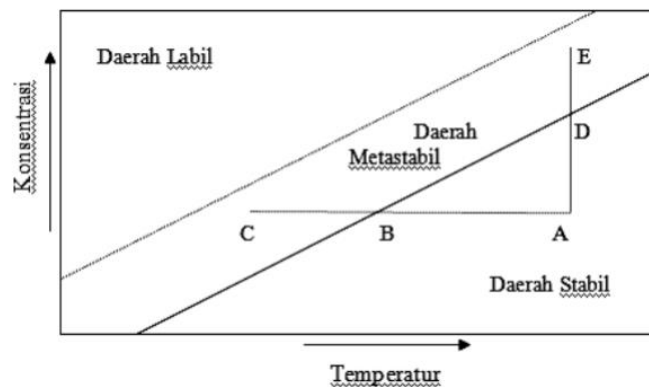
Proses kristalisasi melibatkan dua tahap proses. Tahap pertama adalah pembentukan inti, dimana zat padat baru mulai terbentuk. Tahap kedua adalah pertumbuhan kristal, dimana inti zat padat yang baru terbentuk mengalami pertumbuhan menjadi kristal yang lebih besar (Suharso dan Buhani, 2015). Kristal-kristal yang terbentuk memiliki muatan ion yang lebih rendah dan cenderung untuk bergabung, sehingga dapat menghasilkan pembentukan kerak (Sudarmaji dan Saroso, 2021).

## 2. Kelarutan Endapan

Endapan terbentuk saat larutan mengandung terlalu banyak zat tertentu hingga mencapai tingkat kejenuhan. Endapan ini bisa berupa kristal atau koloid yang dapat diambil dari larutan melalui proses penyaringan. Tingkat kelarutan suatu zat dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu, tekanan, konsentrasi, komponen lain dalam larutan, dan komposisi pelarut (Suharso dan Buhani, 2015).

## 3. Derajat Lewat Jenuh (Supersaturasi)

Supersaturasi adalah kondisi dimana larutan memiliki konsentrasi padatan terlarut yang melebihi konsentrasi kesetimbangan yang seharusnya. Dalam keadaan supersaturasi, suatu larutan memiliki molekul dengan muatan ion yang lebih rendah dimana molekul-molekul ini cenderung berkumpul dan membentuk kerak (Sudarmaji dan Saroso, 2021). Semakin tinggi derajat lewat jenuh maka semakin besar kemungkinan untuk membentuk inti baru sehingga akan semakin besar laju pembentukan inti yang mengakibatkan kristal yang terbentuk semakin besar pula.



**Gambar 1.** Diagram temperatur-konsentrasi (Suharso dan Buhani, 2015)

Berdasarkan gambar 1, garis tebal menunjukkan kelarutan normal untuk zat terlarut dalam pelarut dan garis putus-putus merupakan kurva lewat jenuh yang posisinya dalam diagram tergantung pada zat-zat pengotor. Pada daerah stabil (tidak jenuh), tidak akan terjadi kristalisasi. Pada daerah metastabil (lewat jenuh), dimungkinkan terjadi kristalisasi tetapi tidak secara spontan. Pada daerah labil,

terjadi kristalisasi dengan nukleasi yang kemungkinan dapat terjadi secara spontan. Jika larutan di titik A didinginkan tanpa kehilangan pelarut sampai melewati kurva kelarutan sepanjang ABC, nukleasi spontan tidak akan terjadi hingga titik C terlewati. Pengurangan pelarut dengan temperatur konstan ditunjukkan oleh garis ADE yang dapat menimbulkan supersaturasi (Suharso dan Buhani, 2015).

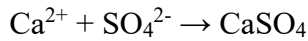
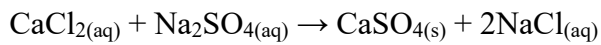
#### 2.4 Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ )

Kalsium merupakan logam berwarna putih perak yang relatif lunak dan memiliki sifat mudah bereaksi dengan oksigen dan air. Secara alami, kalsium membentuk senyawa seperti kalsium karbonat, kalsium fluorida, dan kalsium sulfat (Evilina, 2019). Dalam bentuk mineralnya, kalsium sulfat dikenal sebagai gipsum, dengan bentuk utamanya adalah senyawa dihidrat. Gipsum adalah mineral sulfat yang ditemukan dalam batuan sedimen yang terdiri dari kalsium sulfat dihidrat dengan rumus kimia  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Dalam keadaan murni, gipsum berbentuk kristal berwarna putih, sedangkan jika kandungannya kurang murni, dapat berwarna abu-abu, kuning, jingga, atau hitam (Auditia *et al.*, 2018).

Kristal kalsium sulfat memiliki beberapa fasa, termasuk gipsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), basanit ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), dan anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ). Kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) adalah salah satu komponen endapan yang berkontribusi pada pembentukan kerak, yang dapat mengakibatkan penurunan performa boiler dan mengurangi kapasitas penukar panas, terutama pada proses yang melibatkan air pada suhu tinggi. Keberadaan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) tersebut dapat menyebabkan kerusakan serta menurunkan efisiensi peralatan yang ada (Auditia *et al.*, 2018; Rakhmania *et al.*, 2017).

Kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) sering ditemukan dalam industri minyak dan industri lainnya. Pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$  terjadi karena reaksi antara ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dalam bentuk  $\text{CaCl}_2$  dengan ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dalam bentuk  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang tidak

larut dalam air. Proses reaksi yang menunjukkan terbentuknya endapan dan kerak kalsium sulfat adalah sebagai berikut:



(Suharso dan Buhani, 2015).

## 2.5 Metode Pencegahan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO<sub>4</sub>)

Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terbentuknya kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) pada peralatan-peralatan industri, di antaranya:

### 1. Pengendalian pH

Pencegahan kerak dapat dilakukan dengan penggunaan aditif asam sebagai inhibitor. Aditif ini dapat menurunkan pH larutan, mengontrol ion impuritas senyawa anorganik, serta mengatur komposisi morfologi dan fase kristal, sehingga dapat mencegah proses nukleasi dan pertumbuhan kristal. Namun menghilangkan kerak menggunakan asam dengan konsentrasi tinggi tidak efektif karena dapat meningkatkan laju korosi. Selain itu, penggunaan inhibitor kimia yang mengandung fosfonat dan karboksilat harus dilakukan dengan hati-hati, karena dapat mempengaruhi kualitas air (Fatra dan Suwignyo, 2020).

### 2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air

Proses pelunakan air adalah metode yang digunakan untuk mengurangi konsentrasi ion kalsium, magnesium, dan ion-ion lainnya dalam air yang memiliki tingkat kesadahan tinggi (*hardness*). Tujuan dari proses ini adalah untuk mengurangi atau menghilangkan kesadahan air, sehingga menghasilkan air dengan kandungan mineral yang lebih rendah atau lebih lunak (Gifari *et al.*, 2022). Masalah kerak tidak akan muncul jika menggunakan air bebas mineral, karena semua garam terlarut dapat dihilangkan. Oleh karena itu, penggunaan air bebas mineral merupakan solusi efektif untuk mencegah pembentukan kerak dalam sistem dengan suhu tinggi. Namun, dalam industri-industri besar, penggunaan air bebas mineral seringkali melibatkan biaya yang tinggi, yang

pada akhirnya dapat mempengaruhi efisiensi operasional (Halimatuddahlia, 2003).

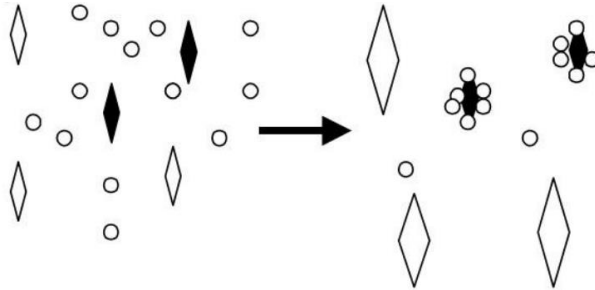
### 3. Penggunaan Inhibitor Kerak

Secara umum, inhibitor kerak adalah substansi kimia yang ketika ditambahkan dalam konsentrasi kecil ke dalam air, dapat berfungsi untuk menghentikan atau mencegah pembentukan kerak (Halimatuddahlia, 2003). Fungsi utama inhibitor kerak adalah mempertahankan keberadaan anion dan kation yang berpotensi membentuk kerak tetap terlarut dalam larutan, sehingga diharapkan dapat mencegah terbentuknya lapisan kerak (Raharjo *et al.*, 2016). Inhibitor umumnya dimasukkan ke dalam larutan baik secara kontinu maupun secara berkala. Penerapan inhibitor merupakan solusi yang baik karena memiliki sifat yang ramah lingkungan, ekonomis, dan mudah diakses. Efektivitas inhibitor kerak tergantung pada kemampuan aditif tersebut untuk mengganggu tahapan-tahapan dalam pembentukan kerak (Raharjo, 2020).

Salah satu cara untuk mencegah pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$  dalam pipa adalah dengan menggunakan inhibitor. Inhibitor ini memiliki kemampuan untuk mengontrol pertumbuhan kristal dan mengubah bentuk kristal sehingga dapat berperan dalam menghambat pembentukan kerak. Inhibitor menjadi solusi yang efektif dalam mengontrol proses pembentukan inti dan pertumbuhan kristal yang terjadi pada permukaan kristal yang sedang berkembang. Penambahan inhibitor mempengaruhi pembentukan massa kerak. Semakin tinggi konsentrasi inhibitor yang ditambahkan, semakin kecil massa kerak yang terbentuk (Raharjo, 2020).

Mekanisme kerja dari inhibitor kerak dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar 2 memberikan ilustrasi tentang cara kerja inhibitor dalam mengadsorpsi pada sisi-sisi pertumbuhan kristal dari inti kristal (ditunjukkan dengan kristal yang diwarnai hitam), yang mengakibatkan penghambatan dalam pertumbuhan kristal itu sendiri. Sementara itu, inti kristal yang tidak teradsorpsi oleh

inhibitor (ditunjukkan oleh kristal yang tidak diwarnai) akan mengalami pertumbuhan secara normal (Suharso *et al.*, 2009; Suharso *et al.*, 2014).



**Gambar 2.** Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ( $\circ$  = inhibitor,  $\diamond$  = bibit kristal) (Suharso *et al.*, 2014)

## 2.6 Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit

Negara Indonesia sebagai produsen terbesar minyak kelapa sawit, menghasilkan sejumlah besar limbah dari industri ini. Salah satu jenis limbah yang banyak dihasilkan adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), yang merupakan tandan kelapa sawit yang telah dipisahkan dari buahnya sebagai produk utama yang digunakan untuk membuat minyak mentah kelapa sawit atau *Crude Palm Oil* (CPO). Banyaknya tandan kosong kelapa sawit yang tidak dimanfaatkan dapat memiliki dampak negatif pada lingkungan, sehingga diperlukan upaya untuk mengatasi masalah ini (Sari *et al.*, 2019). Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Tandan kosong kelapa sawit (Praevia dan Widayat, 2022)



Berdasarkan permasalahan yang ada, perlu dilakukan upaya pengembangan proses konversi TKKS menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi tinggi, ramah lingkungan, serta dapat membantu dalam mengatasi masalah utama dalam pengelolaan limbah dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS). Salah satu teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan ini adalah melalui proses pirolisis. Pirolisis adalah suatu proses dekomposisi material yang terjadi pada suhu tinggi dan dalam lingkungan yang tidak mengandung oksigen (O<sub>2</sub>). Selain menghasilkan produk utama, pirolisis juga menghasilkan produk samping berupa asap cair yang memiliki potensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi. Asap cair ini dihasilkan dari pembakaran bahan yang kaya akan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang kemudian menghasilkan senyawa asam dan turunannya, serta fenol (Febriyanti *et al.*, 2019; Kresnawaty *et al.*, 2017).

Asap cair adalah produk yang terbentuk melalui kondensasi atau pengembunan dari uap yang dihasilkan oleh proses pembakaran, baik secara langsung maupun tidak langsung dari bahan-bahan yang memiliki kandungan tinggi lignin, selulosa, hemiselulosa, dan berbagai senyawa karbon lainnya (Sari *et al.*, 2018). Pada umumnya, berbagai jenis bahan baku dapat digunakan untuk menghasilkan asap cair ini. Asap cair memiliki banyak manfaat, salah satu manfaat utama dari asap cair ini adalah penggunaannya sebagai inhibitor (Choi *et al.*, 2017).

Komposisi dari asap cair yang dihasilkan akan bervariasi tergantung pada jenis bahan yang digunakan sebagai bahan baku. Menurut Sari *et al.*, (2018), asap cair hasil dari pirolisis tandan kosong kelapa sawit memiliki komposisi yang terdiri dari beberapa senyawa fenolik, alkohol, asam-asam organik, serta senyawa karbonil. Kemungkinan besar, kandungan fenol dalam asap cair dari TKKS diduga berasal dari proses pembakaran dalam lingkungan dengan kadar oksigen yang terbatas. Akibatnya, senyawa lignin mengalami perubahan menjadi senyawa fenol dan turunannya.

Menurut penelitian yang dilakukan Lestari *et al.*, (2015), kandungan kimia asap cair hasil pirolisis TKKS yang diuji menggunakan GC-MS didapatkan 23 jenis

senyawa. Komponen kimia yang terkandung dalam asap cair TKKS dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Kandungan kimia asap cair tandan kosong kelapa sawit

Nama senyawa	% area
asam asetat	44,70
fenol	21,65
2-furankarboksildehyd	3,85
2-propanon	3,60
4-metilfenol	2,00
2-metoksifenol	2,15
2-metilfenol	1,50
3-butanon	1,38
2-metoksi-4-metilfenol	1,15
butirolakton	1,13
2-metil-2-siklopenten-1-on	0,78
2-siklopenten-1-on	0,70
etanon	0,68
3-etilfenol	0,67
asam benzoat	0,62
piridin	0,52
2,6-dimetoksifenol	0,56
3,5-dimetilfenol	0,56
etanon	0,48
2,3-dimetil-2-siklopenten-1-on	0,46
4-etil-2-metoksifenol	0,44
2-furankarboksildehyd	0,44
benzaldehyd	0,32

(Lestari *et al.*, 2015).

Mahmud *et al.*, (2021) melakukan proses pirolisis TKKS dengan menggunakan bahan baku TKKS sebanyak 300 g dengan pembakaran selama 1 jam menghasilkan 70 mL asap cair TKKS dengan kandungan fenol sebesar 9,98%. Sementara itu, hasil uji GC-MS asap cair TKKS oleh Sari *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa asap cair TKKS mengandung asam asetat 5,48% dan fenol sebanyak 9,23%.

Oramahi *et al.*, (2021) menyatakan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, semakin tinggi pula kadar fenol yang terkandung didalamnya. Selain itu, faktor lain yang mempengaruhi besarnya kandungan fenol dalam asap cair adalah banyaknya kandungan lignin dalam bahan, dimana semakin besar kandungan lignin semakin

besar pula kandungan fenol dalam asap cair. Namun, kadar asam asetat dipengaruhi oleh banyaknya kandungan selulosa, semakin tinggi kandungan selulosa maka semakin tinggi pula kadar asam asetat pada asap cair (Asmawit dan Hidayati, 2016). Asap cair TKKS hasil proses pirolisis yang dilakukan oleh Lestari *et al.*, (2015) dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Asap cair TKKS hasil pirolisis (Lestari *et al.*, 2015)

## 2.7 Metode *Seeded Experiment*

Pada penelitian ini, dilakukan dengan menggunakan metode *seeded experiment*.

Metode *seeded experiment* merupakan salah satu metode pembentukan kristal dengan cara menambahkan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan.

Penambahan bibit kristal dilakukan untuk mendorong terjadinya proses kristalisasi menjadi lebih cepat. Adanya area permukaan yang lebih besar pada bibit kristal akan mempermudah pertumbuhan kristal menjadi lebih besar. Semakin cepat proses kristalisasi berlangsung, semakin cepat pula laju pertumbuhan inti kristal kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ), sehingga kristal yang lebih besar dapat terbentuk dengan lebih cepat. Hal ini dilakukan untuk melihat laju pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) setelah ditambahkan inhibitor dengan penambahan bibit kristal (*seeded experiment*) (Rahmania, 2012).

## 2.8 Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat (CaSO<sub>4</sub>)

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa analisis dan karakterisasi terhadap kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) yang telah terbentuk. Adapun analisis yang dilakukan yaitu analisis 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<sub>4</sub>. 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<sub>4</sub>). Analisis dan karakterisasi ini dilakukan dengan tujuan agar mengetahui seberapa efektif inhibitor asap cair tandan kelapa sawit dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>).

### 2.8.1 Spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Spektrofotometer inframerah (IR) merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur suatu senyawa dengan mendeteksi gugus-gugus fungsional utama dalam material yang dianalisis. Setiap gugus fungsi memiliki pola serapan yang unik, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi tersebut dalam suatu material. FTIR berguna dalam mengidentifikasi material yang belum diketahui, mendeteksi kontaminan pada material, serta menemukan zat aditif. Informasi yang didapat yaitu berupa bilangan gelombang dan intensitas absorpsi. Bilangan gelombang merupakan satuan radiasi dalam daerah vibrasi inframerah yang dinyatakan dengan cm<sup>-1</sup> (Sindhu *et al.*, 2015; Titus *et al.*, 2019).

Bila radiasi inframerah dilewatkan melalui suatu cuplikan, maka molekul-molekulnya dapat menyerap radiasi inframerah (IR), energi yang diserap akan menyebabkan kenaikan amplitude getaran atom-atom yang terikat sehingga molekul-molekul tersebut berada pada keadaan vibrasi tereksitasi (*excited*

*vibrational state*), energi yang diserap ini akan dibuang dalam bentuk panas bila molekul itu kembali ke keadaan dasar. Dengan demikian spektrofotometer IR dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya gugus fungsi dalam suatu molekul (Kombongkila *et al.*, 2024). Nilai perkiraan daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsional seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsi

Daerah Spektra (cm <sup>-1</sup> )	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

(Kombongkila *et al.*, 2024).

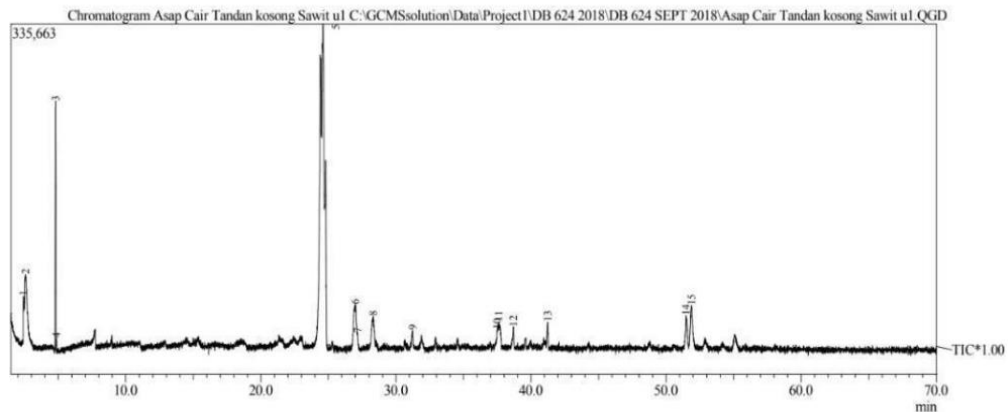
### 2.8.2 *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*

Metode GC-MS digunakan untuk pemisahan dan mengidentifikasi suatu komponen dalam suatu campuran sampel yang umumnya berupa senyawa-senyawa yang mudah menguap. GC-MS menggunakan dua metode analisis senyawa yaitu kromatografi gas (GC) untuk memisahkan komponen senyawa dalam suatu analit dan spektroskopi massa (MS) untuk mengidentifikasi komponen dari analit tersebut. GC-MS bertujuan sebagai alat pemisah berbagai komponen pada suatu sampel yang pemisahannya tergantung dari titik didih senyawa yang ada pada suatu sampel yang dianalisis (Rahayu *et al.*, 2013; Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

*Gas Chromatography (GC)* adalah metode pemisahan yang digunakan untuk menganalisis senyawa-senyawa yang memiliki sifat mudah menguap atau senyawa-senyawa yang dapat diuapkan dengan mudah. Prinsip kerja dari alat kromatografi gas ini adalah sampel cairan diinjeksikan kedalam injektor yang nantinya akan diuapkan. Sampel yang sudah diuapkan tersebut kemudian dibawa oleh gas pembawa menuju kolom tempat terjadinya pemisahan. Senyawa dengan titik didih yang tinggi memiliki waktu retensi yang lama dibandingkan dengan

senyawa yang memiliki titik didih lebih rendah (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

*Mass Spectrometer* (MS) adalah teknik analisis yang dapat digunakan secara selektif untuk mendeteksi dan mengidentifikasi komposisi suatu sampel. Prinsip kerja spektrometri massa adalah menembak bahan yang sedang dianalisis dengan berkas elektron dan secara kuantitatif mencatat hasilnya sebagai suatu spektrum fragmen ion positif. Fragmen ion positif tersebut nantinya akan berkelompok sesuai dengan massanya sehingga nantinya diperoleh berat molekul dari senyawa yang terkandung (Margareta dan Wonorahardjo, 2023). Hasil uji GC-MS asap cair TKKS ditunjukkan pada Gambar 5.



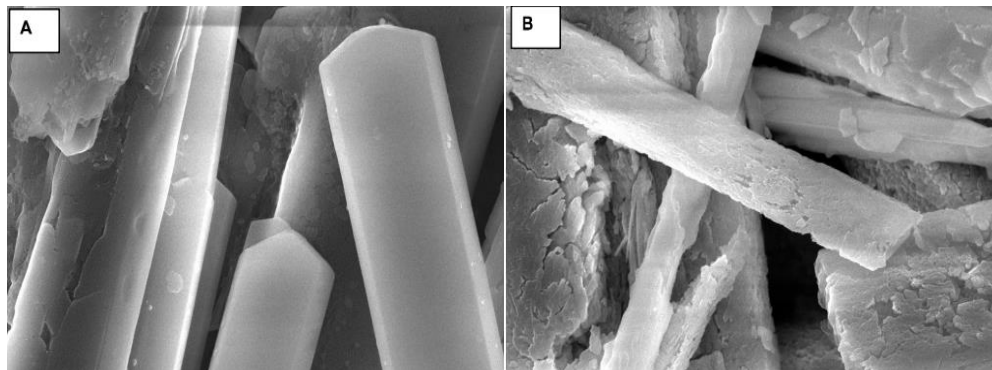
**Gambar 5.** Hasil uji GC-MS asap cair TKKS (Sari *et al.*, 2019)

### 2.8.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menghasilkan gambar profil permukaan atau morfologi suatu material. Pada dasarnya, SEM mengarahkan berkas elektron berenergi tinggi ke permukaan bahan yang akan diamati. Ketika permukaan benda terkena berkas elektron, berkas tersebut akan dipantulkan kembali atau menghasilkan elektron sekunder yang tersebar ke berbagai arah. Namun, hanya ada satu arah di mana berkas elektron dipantulkan kembali dengan intensitas tertinggi. Hasil interaksi elektron dengan permukaan bahan berupa elektron sekunder akan ditangkap oleh detektor SE (*Secondary Electron*). Sinyal ini

kemudian diolah, diperkuat oleh penguat (amplifier), dan hasilnya divisualisasikan pada layar monitor sinar katoda (CRT). Hasil dari karakterisasi ini adalah *Scanning Electron Micrograph* yang menggambarkan struktur permukaan suatu bahan dalam tiga dimensi. Gambar ini dapat diperbesar 1.000 hingga 40.000 kali lipat, memungkinkan pengamatan dengan resolusi yang sangat tinggi terhadap detail-detail struktur permukaan tersebut (Sujarwata dan Astuti, 2015; Didik, 2020; Mardiyah *et al.*, 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh Suharso *et al.*, (2014) melalui pengamatan morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa inhibitor dan dengan penambahan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm dapat terlihat pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan inhibitor membuat bentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  menjadi relatif lebih kecil, rapuh, dan tidak beraturan dibandingkan dengan kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa inhibitor.



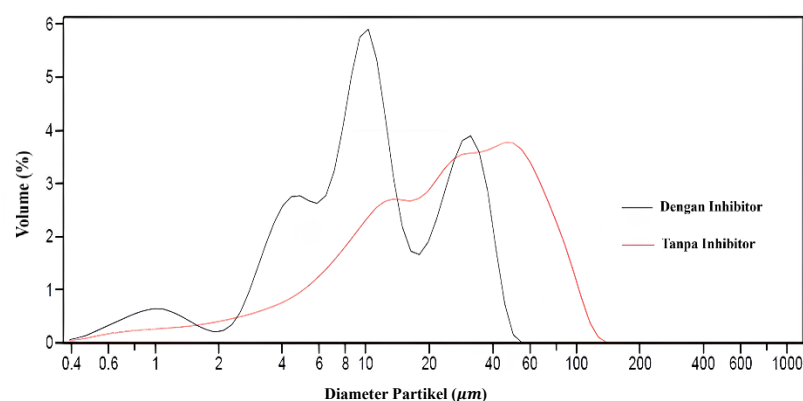
**Gambar 6.** Morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$  (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm (Suharso *et al.*, 2014)

#### 2.8.4 *Particle Size Analyzer (PSA)*

Alat analisis ukuran partikel (*Particle Size Analyzer*) adalah sebuah instrumen yang digunakan untuk mengkarakterisasi distribusi ukuran partikel dalam sebuah sampel serta untuk mengukur volume yang dimiliki setiap partikel di dalam sampel tersebut. Di laboratorium, penggunaan *Particle Size Analyzer (PSA)* meliputi pengukuran ukuran partikel pada berbagai jenis sampel, termasuk yang berwujud padat, emulsi, aerosol, dan suspensi (Fitriana *et al.*, 2022). Prinsip kerja

*Particle Size Analyzer* (PSA) melibatkan penggunaan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) yang memanfaatkan hamburan cahaya inframerah. Cahaya inframerah ditembakkan ke arah sampel, mengakibatkan interaksi dengan sampel dan menghasilkan gerakan Brownian (gerakan acak dari partikel sangat kecil di dalam cairan sebagai hasil dari tumbukan dengan molekul-molekul cairan). Gerakan acak ini kemudian dianalisis oleh alat, dimana semakin kecil ukuran molekul maka gerakan tersebut akan semakin cepat (Horiba, 2014).

Analisis menggunakan PSA dalam penelitian ini untuk mengetahui distribusi ukuran partikel berukuran nanometer dari kerak kalsium sulfat. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Suharso *et al.*, (2021) hasil analisis distribusi partikel dari kerak kalsium sulfat mengalami perubahan setelah menggunakan inhibitor. Hal ini dapat terlihat dari hasil PSA yang ditunjukkan oleh Gambar 7.



**Gambar 7.** Distribusi ukuran partikel  $\text{CaSO}_4$  (Suharso *et al.*, 2021)

### 2.8.5 X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis Difraksi Sinar-X atau *X-ray Diffraction* (XRD) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan mengukur parameter struktur kisi dan untuk mendapatkan ukuran partikel. Data profil XRD juga dapat memberikan informasi kualitatif dan sebagian kuantitatif mengenai padatan atau sampel. Metode XRD memiliki kemampuan yang sangat kuat untuk menganalisis mineral-mineral dengan ukuran yang sangat kecil, yang sulit diamati menggunakan mikroskop optik (Fatimah dan Utami, 2017; Meirawaty *et al.*, 2022).





### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2023-Mei 2024 di Laboratorium Anorganik/Fisik, Jurusan Kimia, 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, analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dilakukan di Laboratorium Sentral Universitas Padjajaran, dan analisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu alat-alat gelas, termometer, *waterbath* (Thermoscientific AC 200/S21) diproduksi di Amerika Serikat, gelas-gelas plastik, spinbar, pengaduk magnet (Stuart CB 162) diproduksi di China, oven (merek Innotech) diproduksi China, neraca analitik (Airshwoth AA-160) diproduksi Jepang, pH meter (Methrom 827) diproduksi di Swiss, spektrofotometer IR (merek Cary 630 Agilent) diproduksi di California, *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) (merek Shimadzu QP2010

SE) diproduksi di Jepang, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (merek JSM 6510 LA) diproduksi di Jepang, *Particle Size Analyzer* (PSA) (merek Coulter LS 13320) diproduksi di *United States*, dan *X-Ray Diffraction* (XRD) (merek Philip *Analytical*) diproduksi di Belanda.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah  $\text{CaCl}_2$  anhidrat,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , akuades, kertas saring, dan asap cair tandan kosong kelapa sawit.

### **3.3 Prosedur Penelitian**

#### **3.3.1 Pembuatan Asap Cair**

Asap cair yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari tandan kosong kelapa sawit melalui proses pirolisis. Pembuatan asap cair tandan kosong kelapa sawit dilaksanakan di Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST), Universitas Lampung. Tandan kosong kelapa sawit terlebih dahulu dipotong hingga ukurannya menjadi lebih kecil. Kemudian dicuci dan dikeringkan di bawah sinar matahari langsung. Tandan kosong kelapa sawit yang sudah kering dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, kemudian dilakukan proses pirolisis dengan lama waktu pirolisis bila asap cair sudah berhenti menetes. Asap yang keluar dari reaktor dialirkan melalui pipa ke rangkaian kondensor, dimana asap tersebut akan mengalami kondensasi dan berubah menjadi bentuk asap cair. Asap cair yang keluar dari kondensor kemudian ditampung dalam wadah penampungan (Sari *et al.*, 2018).

#### **3.3.2 Pembuatan Inhibitor dari Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Variasi Konsentrasi**

Pembuatan inhibitor diawali dengan membuat larutan stok asap cair tandan kosong kelapa sawit konsentrasi 1000 ppm dengan cara mengencerkan 1 mL atau setara dengan 1 g asap cair tandan kosong kelapa sawit dengan akuades 1000 mL hingga tanda tera, kemudian dihomogenkan. Pada penelitian ini, digunakan asap

cair tandan kosong kelapa sawit dengan variasi konsentrasi 75, 100, 125, dan 150 ppm. Larutan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit konsentrasi 75 ppm dibuat dengan cara mengencerkan asap cair tandan kosong kelapa sawit sebanyak 75 mL dengan akuades dalam labu ukur 1000 mL hingga tanda tera, kemudian dihomogenkan sehingga didapatkan larutan inhibitor dengan konsentrasi 75 ppm. Selanjutnya diukur nilai keasamannya menggunakan pH meter. Perlakuan yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit dengan konsentrasi 100, 125, dan 150 ppm. Kemudian untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam asap cair tandan kosong kelapa sawit dilakukan analisis menggunakan spektrofotometer IR dan untuk mengetahui komponen senyawa kimianya dilakukan analisis menggunakan GC-MS.

### 3.3.3 Pembuatan Bibit Kristal

Proses pembuatan bibit kristal dalam penelitian ini dilakukan dengan cara mencampurkan masing-masing  $\text{CaCl}_2$  anhidrat (larutan 1 M) sebanyak 27,75 g dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (larutan 1 M) sebanyak 35,5 g dengan 250 mL akuades dan dimasukkan ke dalam gelas kimia. Larutan dihomogenkan dengan cara diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 90 °C selama 15 menit. Kemudian, larutan  $\text{CaCl}_2$  anhidrat dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dicampurkan dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 90 °C selama 15 menit hingga larutan mengendap dengan sempurna. Endapan  $\text{CaSO}_4$  yang telah terbentuk dipisahkan dari larutan menggunakan kertas saring lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C. Proses ini diulang beberapa kali hingga didapatkan bibit kristal yang cukup untuk melakukan penelitian. Hasil kristal yang didapatkan akan digunakan sebagai bibit kristal untuk diamati pertumbuhannya (Suharso *et al.*, 2009).

### 3.3.4 Pengujian Inhibitor Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit dalam Pembentukan Kristal Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ )

Pengujian asap cair tandan kosong kelapa sawit sebagai inhibitor dalam menghambat pembentukan kristal kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) dengan metode *seeded experiment* dilakukan melalui beberapa tahapan, diantaranya sebagai berikut:

### 3.3.4.1 Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ Tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan  $\text{CaSO}_4$  0,038 M dibuat dari larutan 0,075 M  $\text{CaCl}_2$  anhidrat dan larutan 0,075 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang masing-masing dilarutkan dalam 200 mL akuades. Selanjutnya masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet (spinbar) pada suhu 90 °C selama  $\pm 15$  menit hingga larutan menjadi homogen. Kemudian larutan  $\text{CaCl}_2$  anhidrat 0,075 M dan larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,075 M dicampurkan dan diaduk lagi menggunakan pengaduk magnet (spinbar) pada suhu 90 °C selama 15 menit agar dapat terbentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  dengan konsentrasi 0,038 M dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Setelah kedua larutan dicampurkan, larutan dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik yang berbeda dengan masing-masing sebanyak 50 mL larutan pertumbuhan dan ditambahkan 0,2 g bibit kristal. Kemudian diletakkan di dalam *waterbath* pada suhu 90 °C selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dapat dilakukan pada waktu 15 menit pertama satu gelas diambil dan disaring menggunakan kertas saring yang telah ditimbang. Kemudian dicuci dengan akuades dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3-4 jam. Gelas selanjutnya diambil tiap 10 menit sekali hingga pada gelas yang terakhir. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan  $\text{CaCl}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 0,100; 0,125; dan 0,150 M untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa penambahan inhibitor sebesar 0,050; 0,063; dan 0,075 M. Endapan  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi inhibitor yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kristal menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

### 3.3.4.2 Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal $\text{CaSO}_4$ menggunakan Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan  $\text{CaSO}_4$  dibuat dari larutan 0,075 M  $\text{CaCl}_2$  anhidrat dan larutan 0,075 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang masing-masing dilarutkan dalam 200 mL inhibitor asap cair 75 ppm. Selanjutnya masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet (spinbar) pada suhu 90 °C selama 15 menit hingga larutan menjadi homogen. Kemudian larutan  $\text{CaCl}_2$  anhidrat 0,075 M dan larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,075 M dicampurkan dan diaduk lagi menggunakan pengaduk magnet (spinbar) pada suhu 90 °C selama 15 menit agar dapat terbentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  dengan konsentrasi 0,038 M dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Setelah kedua larutan dicampurkan, larutan dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik yang berbeda dengan masing-masing sebanyak 50 mL larutan pertumbuhan dan ditambahkan 0,2 g bibit kristal. Kemudian diletakkan di dalam *waterbath* pada suhu 90 °C selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dapat dilakukan pada waktu 15 menit pertama satu gelas diambil dan disaring menggunakan kertas saring yang telah ditimbang. Kemudian dicuci dengan akuades dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3-4 jam. Selanjutnya gelas diambil tiap 10 menit sekali hingga pada gelas yang terakhir. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan  $\text{CaCl}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 0,100; 0,125; dan 0,150 M serta variasi konsentrasi inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit 100, 125, dan 150 ppm untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  dengan inhibitor sebesar 0,050; 0,063; dan 0,075 M. Endapan  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi inhibitor yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kristal menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

### 3.3.5 Analisis Data

Analisis data dilakukan berdasarkan jumlah kristal kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) yang terbentuk terhadap waktu, baik dalam kondisi tanpa penambahan inhibitor maupun dengan penambahan inhibitor. Penelitian ini dilakukan dengan berbagai variasi konsentrasi larutan pertumbuhan  $\text{CaSO}_4$  dan variasi konsentrasi inhibitor, dimana masing-masing data akan diolah dan diplot dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel 2019 untuk menghasilkan grafik yang menunjukkan jumlah massa kristal  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk terhadap waktu laju pertumbuhan kristal  $\text{CaSO}_4$ . Nilai slope atau kemiringan yang dihasilkan dari masing-masing grafik tersebut menunjukkan tingkat pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$ . Kemudian morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk sebelum atau setelah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Selain itu, perubahan ukuran partikel  $\text{CaSO}_4$  pada masing-masing endapan dari setiap percobaan dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA). Struktur kristal  $\text{CaSO}_4$  sebelum dan setelah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan *X-ray Diffactogram* (XRD).

Data yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui efektivitas dari asap cair tandan kosong kelapa sawit sebagai inhibitor dengan menggunakan Persamaan 1 yang telah dijelaskan dalam penelitian sebelumnya (Suharso *et al.*, 2019).

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

Keterangan:

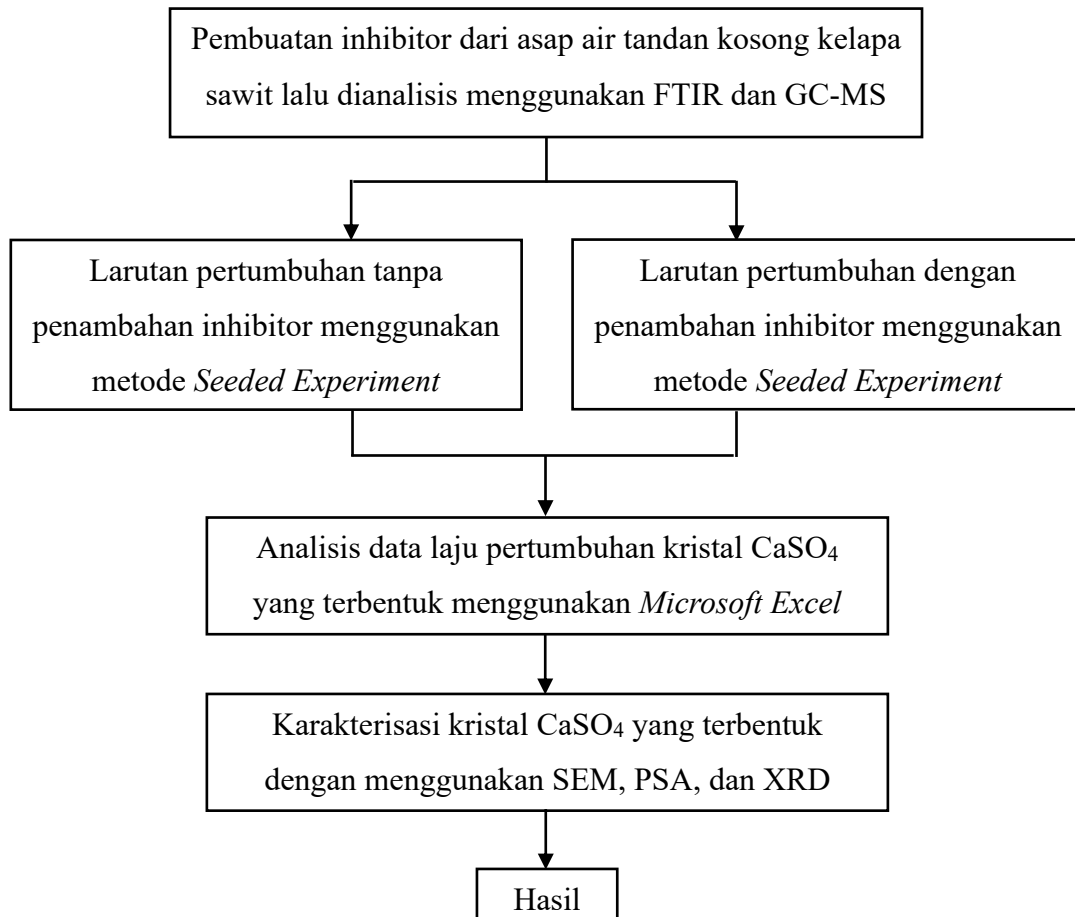
$C_a$  = berat endapan dengan penambahan inhibitor pada saat kesetimbangan (g/L)

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

$C_0$  = berat endapan awal (g/L).

### 3.3.6 Diagram Alir Penelitian

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



**Gambar 9.** Diagram Alir Penelitian



## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

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

1. Asap cair tandan kosong kelapa sawit dapat digunakan sebagai inhibitor untuk menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) yang ditunjukkan dengan perbedaan morfologi, fasa kristalin, dan ukuran partikel kerak  $\text{CaSO}_4$ .
2. Persentase efektivitas inhibitor terbaik dalam menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) didapatkan pada konsentrasi larutan pertumbuhan  $\text{CaSO}_4$  0,038 M dan konsentrasi inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit 150 ppm dengan persentase penghambatan 50,82%.
3. Analisis kerak  $\text{CaSO}_4$  menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan terjadinya perubahan morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$ . Sebelum penambahan inhibitor, kerak terlihat berbentuk panjang seperti batang, berukuran besar, lebar, dan padat, sedangkan setelah penambahan inhibitor kerak menjadi berukuran lebih kecil dan pendek.
4. Analisis kerak  $\text{CaSO}_4$  menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel kerak  $\text{CaSO}_4$  mengalami penurunan nilai rata-rata dan nilai tengah ukuran partikel kerak  $\text{CaSO}_4$  setelah ditambahkan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit 150 ppm.

5. Analisis kerak  $\text{CaSO}_4$  menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) menunjukkan adanya fase kristal gipsum dan basanit pada difraktogram tanpa penambahan inhibitor, sedangkan setelah ditambahkan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit 150 ppm muncul fasa baru yaitu anhidrit yang didominasi oleh fase basanit dan fasa gipsum yang mulai menghilang.

## 5.2 Saran

Untuk meningkatkan mutu penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan saran agar dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap penghambatan jenis kerak lain menggunakan inhibitor asap cair tandan kosong kelapa sawit dengan grade yang berbeda. Inhibitor digunakan dengan konsentrasi yang berbeda menggunakan metode yang berbeda yakni tanpa penambahan bibit kristal (*unseeded experiment*).

## DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, V. 2019. Pengaruh Penambahan Aditif 5 Ppm Ion  $\text{Cu}^{2+}$  Terhadap Pertumbuhan Kerak Mg Pada Pipa Laminer Dengan Laju 30 mL/Menit. *Majalah Ilmiah Teknik Mesin*. 19 (2): 76-86.
- Asmawit dan Hidayati. 2016. Karakteristik Destilat Asap Cair dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Proses Redistilasi. *Majalah BIAM*. 12 (2): 8-14.
- Auditia, B. A., Rendih, R., Elnov, D., Mulatua, dan Rachmansya, R. 2018. Pengaruh Penggunaan Bubuk Gypsum sebagai Filler dalam Campuran Aspal. *Jurnal Teknik dan Ilmu Komputer*. 7 (26): 149-155.
- Azimi, G. and Papangelakis, V. G. 2011. Mechanism and Kinetics of Gypsum Anhydrite Transformation in Aqueous Electrolyte Solutions. *Hydrometallurgy*. 7 (26): 1-129.
- Balaz, I. 2008. *Mechanochemistry in Nanoscience and Mineral Engineering*. Springer. Berlin.
- Choi, H., Choi, H., Inoue, M., and Sengoku, R. 2017. Control of The Polymorphism of Calcium Carbonate Produced by Self-Healing in The Cracked Part of Cementitious Materials. *Applied Sciences*. 546 (7): 1-16.
- Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. LPTIK Universitas Andalas. Padang.
- 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.
- Didik, L. A. 2020. Penentuan Ukuran Butir Kristal  $\text{CuCr}_{0,98}\text{Ni}_{0,02}\text{O}_2$  dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope (SEM). *Indonesian Physical Review*. 3 (1): 6-14.
- Evilina, D. 2019. *Ensiklopedia Materi dan Kimia Unsur*. ALPRIN. Semarang.

- Fatimah, N. F. dan Utami, B. 2017. Sintesis dan Analisis Spektra IR, Difraktogram XRD, SEM pada Material Katalis Berbahan Ni/zeolit Alam Teraktivasi dengan Metode Impregnasi. *Journal Cis-Trans (JC-T)*. 1 (1): 35-39.
- Fatra, F. dan Suwignyo, J. 2020. Analisa Pengaruh Penambahan Asam Tartrat terhadap Pembentukan Kerak di dalam Pipa Pengeboran Minyak Bumi. *Journal of Automotive Technology Vocational Education*. 1 (2): 1-8.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., Bindar, Y., dan Irawan, A. 2019. Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil dan Gas dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*. 3 (2): 12-17.
- Fitriana, M., Riyanta, A. B., Amananti, W., Hariyanto, Y. A., Kusnadi, Supriati, H. S., Khoiriyah, M., Kusumaningtyas, F. A., Mahardika, M. P., Hutahaen, T. A., Suena, N. M. D. S., Nurcahyo, H., Maimunah, S., dan Suradnyana, I G. M. 2022. *Fisika Farmasi Sains dan Terapan*. Kaizen Media Publishing. Bandung.
- 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): 387-395.
- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. 2019. Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (X-RD) di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*. 1 (1): 44-51.
- Halimatuddahlia. 2003. *Pencegahan Korosi dan Scale pada Proses Produksi Minyak Bumi*. Mitra Grup. Medan.
- Horiba. 2014. *A Guidebook To Particle Size Analysis*. Horiba Instruments, Inc. USA.
- Ilmah, A. M., Syarifuddin, A., dan Risdianto, A. L. A. 2024. Penerapan Pemodelan Numerik Terhadap Kebocoran Pipa Pada Aliran Fluida. *Jurnal Infromatika dan Teknik Elektro Terapan*. 12 (1): 167-172.
- Kombongkila, O., Taunaumang, H., dan Tumimomor, F. 2024. Analisis Struktur Film Tipis Disperse Orange-3 Hasil FTIR. *Jurnal Fisika dan Terapannya*. 5 (1): 45-50.
- Kresnawaty, I., Putra, S. M., Budiani, A., dan Darmono, T.W. 2017. Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Arang Hayati dan Asap Cair. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*. 14 (3): 171-179.
- Kurniawan, Y. H. 2018. *Studi Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa Grade 2 sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) menggunakan*

- Metode Unseeded Experiment*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Lestari, A. S. dan Sartika, D. 2018. Preparasi dan Karakterisasi Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Menggunakan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Teknologi Technosci*. 11 (1): 7-10.
- Lestari, Y. I., Idiawati, N., dan Harlia. 2015. Aktivitas Antibakteri Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit Grade 2 yang Sebelumnya diadsorpsi Zeolit Teraktivasi. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*. 4 (4): 45-52.
- Luditama, C. 2006. *Isolasi dan Pemurnian Asap cair Berbahan Dasar Tempurung Kelapa secara Pirolisis dan Destilasi*. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.
- Mahmud, Y., Lististio, D., Irfan, M., dan Zam, S. I. 2021. Efektivitas Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Mengendalikan Ganoderma Boninese dan Curvularia Sp. In Vitro. *Jurnal Pertanian Presisi*. 5 (1): 24-39.
- Mardiyah, U., Jamil, S. N. A., dan Sandra, L. 2022. Karakterisasi Mikrostruktur dan Komposisi Unsur Gelatin Kepala Ikan Kurisi (Nemipterus Bathybius) Menggunakan Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). *Journal of Fisheries and Marine Research*. 6 (2): 19-25.
- 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.
- Maley, M. 1999. *Inhibition of Calcite Nucleation and Growth Using Phosphonate*. Curtin University of Technology Western Australia. Australia.
- Meirawaty, M., Nugraheni, R. D., dan Riyandhani, C. P. 2022. *Mineralogi*. Zahira Media Publisher. Banyumas.
- Oramahi, H. A., Rusmiyanto, 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.
- Pavia, D. L. 2006. *Introduction to Organic Laboratory Techniques. 4th Edition*. Brooks Cole/Thomson. United State.
- Praevia, M. F. dan Widayat. 2022. Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*. 3 (1): 28-37.
- Rahayu, F. L., Nuryanto, R., dan Suyati, L. 2013. Pengaruh Diameter Kanal Pelet Katalis Zeolit Aktif dan Ni-Zeolit Terhadap Pirolisis Limbah Batang

- Pohon Sagu (*Metroxylon sp.*). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 16 (1): 33-37.
- Rahmania, Y. 2012. *Studi Pendahuluan Ekstrak Kulit Kakao (Theobroma Cacao L.) dan Nalco 72900 sebagai Inhibitor Pembentuk Kerak Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>)*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Raharjo, S., Bayuseno, A. P., Jamarib, J. M., and Muryanto, S. 2016. Calcium Carbonate Scale Formation in Copper Pipes on Laminar Flow. *MATEC Web of Conferences*. 58 (1): 1-4.
- Raharjo, S. 2020. *Pembentukan dan Pengendalian Kerak Mineral di dalam Pipa*. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Rakhmania, C. D., Khaerunnisa, I., Ismuyanto, B., Nanda, J., dan Himma, N. F. 2017. Adsorpsi Ion Kalsium Menggunakan Biomassa Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) Diregenerasi HCL. *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*. 1 (1): 16-24.
- Riskawati, Magfirah, N., Baharuddin, M., Sappewali, dan Azis, F. 2022. Enkapsulasi Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dan Aktivitasnya Terhadap Jamur *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus niger*. *Al-Kimia*. 10 (1): 60-69.
- Santoso, P., Mariyam, Setiawan, M. R., and Suharso. 2019. Piper Betle Leaf Extract as a Green Inhibitor of Calcium Sulphate (CaSO<sub>4</sub>) Scale Formation. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 258: 1-5.
- Sari, W. T., Andriyan, M. W., dan Safitri, N. L. 2019. Efektifitas E-Solid (Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit) dengan Metode Pirolisis Variasi Redestilasi Sebagai Inovasi Pengawet Ikan Hasil. *Jurnal Ilmiah Penalaran dan Penelitian Mahasiswa*. 3 (1): 177-193.
- Sari, Y. P., Samharinto, S., 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 Scienteeae*. 14 (3): 272-284.
- Shiddiq, F. M. 2014. *Pemanfaatan Biji Pinang Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) dengan Metode Unseeded Experiment*. Skripsi. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Sindhu, R., Binod, P., and Pandey, A. 2015. Microbial Poly-3-Hydroxybutyrate and Related Copolymers. *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. 575-605.

- Sudarmaji, A. T. dan Saroso, H. 2021. Pengaruh Penambahan Larutan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  terhadap Pembentukan Kerak pada Penguapan Nira Tebu. *Distilat*. 7 (2): 635-641.
- Suharso, Buhani, and 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, and Suhartati, T. 2009. Peranan C-Metil-4,10,16,22-Tetrametoksi Caliks[4]Arena Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). *Indonesian Journal of Chemistry*. 9 (2): 206-210.
- Suharso, Buhani, dan Tugiono. 2015. Pembuatan Senyawa Turunan Kaliksarena untuk Inhibitor Kerak Material Anorganik. *Prosiding SEMIRATA*. 1 (1): 197-206.
- Suharso, Buhani, Bahri, S., and Endaryanto, T. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as a Green Inhibitor of Calcium Sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) Scale Formation. *Asian Journal of Research Chemistry*. 3 (1): 183-187.
- 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, dan Buhani. 2022. Extract of Mangosteen Peel (*Garcinia mangostana* L.) as Calcium Carbonate Scale Inhibitor. *RASAYAN*. 15 (3): 1799-1805.
- Suharso dan Buhani. 2011. Efek Penambahan Aditif Golongan Karboksilat dalam Menghambat Laju Pembentukan Endapan Kalsium Sulfat. *Jurnal Natur Indonesia*. 13 (2): 100-104.
- Suharso dan Buhani. 2012. *Penanggulangan Kerak*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- 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. *Rasayan Journal of Chemistry*. 14 (1): 141-148.
- Suharso, Reno, T., Endaryanto, T., and Buhani. 2017. Modification of Gambier Extracs as Green Inhibitor of Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) Scale Formation. *Journal of Water Process Engineering*. 18: 1-6.

- Sujarwata dan Astuti, B. 2015. *Sensor Ofet Berbasis Film Tipis untuk Deteksi Gas Beracun*. Deepublish. Yogyakarta.
- Sundjono dan Saefudin. 2014. Pengaruh Temperatur dan pH Air Sadah Kalsium Sulfat terhadap Korosi pada Baja Karbon. *Majalah Metalurgi*. 29 (1): 41-50.
- Suparwaty. 2016. *Pengaruh Penggunaan Kemenyan (Styrax Benzoin Dryand) sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO<sub>4</sub>)*. Tesis. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Titus, D., Samuel, E. J. J., and Roopan, S. M. 2019. Nanoparticle characterization techniques. *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*. 303-319.
- Yulianto, M. E., Handayani, D., Puspitarini, A. S., Nugraheni, F. S., dan Yanti, N. R. 2018. Pembuatan Serbuk Jahe Instan dengan Metode Kristalisasi Guna Meningkatkan Perekonomian Warga RW.05 Kelurahan Tembalang, Semarang. *SNK-PPM*. 1 (1): 44-46.
- Zhang, X., Wang, J., Wu, J., Jia, X. J., Du, Y., Li, H. and Zhao, B. 2016. Phase and Morphology Controlled Crystallization of Gypsum by Using Flue Gas Desulfurization Gypsum Solid Waste. *Journal of Alloys and Compounds*. 674: 200-206.