

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS  
ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI  
INHIBITOR KERAK KALSIUM SULFAT ( $\text{CaSO}_4$ )  
MENGUNAKAN METODE *UNSEEDED*  
*EXPERIMENT***

**SKRIPSI**

Oleh

**KADEK WENDI SEPTIANI  
2217011018**



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

## ABSTRAK

### STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM SULFAT (CaSO<sub>4</sub>) MENGUNAKAN METODE *UNSEEDED* *EXPERIMENT*

Oleh

**Kadek Wendi Septiani**

Kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) merupakan salah satu permasalahan utama dalam sistem perpipaan industri karena dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas dan menghambat laju aliran fluida, sehingga diperlukan inhibitor yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas asap cair cangkang kelapa sawit sebagai *green inhibitor* pembentukan kerak CaSO<sub>4</sub> menggunakan metode *unseeded experiment* dengan variasi suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C, konsentrasi larutan pertumbuhan 0,02; 0,03; 0,04; dan 0,05 M, serta konsentrasi inhibitor 100, 125, dan 150 ppm. Karakterisasi kerak CaSO<sub>4</sub> dilakukan menggunakan SEM, XRD, dan PSA.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa asap cair hasil pirolisis pada suhu 400 °C memberikan efektivitas penghambatan tertinggi sebesar 91,54% pada konsentrasi larutan 0,02 M dengan inhibitor 150 ppm, dengan urutan performa inhibisi 400 °C > 500 °C > 300 °C. Hasil ini semakin diperkuat melalui pengujian kupon logam dengan nilai efektivitas mencapai 97,80%, mengonfirmasi potensi asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor kerak yang signifikan.

Analisis SEM menunjukkan bahwa kerak CaSO<sub>4</sub> dengan penambahan inhibitor berubah menjadi lebih kecil, rapuh, dan tidak beraturan dibandingkan kerak tanpa inhibitor. Analisis XRD mengonfirmasi bahwa fase gipsum dan bassanit tetap terbentuk pada kedua kondisi tanpa dan dengan inhibitor, namun intensitas puncak difraksi menurun pada sampel dengan inhibitor. Analisis PSA menunjukkan adanya penurunan ukuran partikel kerak setelah penambahan inhibitor, yakni nilai rata-rata (*mean*) menurun dari 7470,2 nm menjadi 6699,8 nm dan nilai tengah (*median*) menurun dari 7031,8 nm menjadi 6730,2 nm, sehingga disimpulkan bahwa inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit mampu menghambat pertumbuhan kerak kalsium sulfat CaSO<sub>4</sub>.

Kata Kunci: asap cair, cangkang kelapa sawit, CaSO<sub>4</sub>, inhibitor, kerak

## ABSTRACT

### STUDI OF THE EFFECT OF HEATING TEMPERATURE ON THE PYROLYSIS PROCESS LIQUID SMOKE FROM PALM OIL SHELLS AS A CALCIUM SULPHATE (CaSO<sub>4</sub>) SCALE INHIBITOR USING THE SEEDLESS METHOD EXPERIMENT

By

**Kadek Wendi Septiani**

Calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>) scale is one of the major problems in industrial piping systems as it can reduce heat transfer efficiency and impede fluid flow rates, necessitating the use of effective and environmentally friendly inhibitors. This study aims to evaluate the effectiveness of palm shell liquid smoke as a green inhibitor for CaSO<sub>4</sub> scale formation using the unseeded experiment method with variations in pyrolysis temperature of 300, 400, and 500 °C, growth solution concentrations of 0.02, 0.03, 0.04, and 0.05 M, and inhibitor concentrations of 100, 125, and 150 ppm. Characterization of CaSO<sub>4</sub> scale was carried out using SEM, XRD, and PSA. The results showed that liquid smoke produced at a pyrolysis temperature of 400 °C provided the highest inhibition effectiveness of 91.54% at a solution concentration of 0.02 M with 150 ppm inhibitor, with the inhibition performance order of 400 °C > 500 °C > 300 °C. These results were further confirmed through metal coupon testing, with an effectiveness value reaching 97.80%, confirming the significant potential of palm shell liquid smoke as a scale inhibitor. SEM analysis revealed that CaSO<sub>4</sub> scale with the addition of inhibitor transformed into smaller, more brittle, and irregular morphology compared to scale formed without inhibitor. XRD analysis confirmed that gypsum and bassanite phases continued to form under both conditions, with and without inhibitor; however, the diffraction peak intensities decreased in the inhibitor-added samples. PSA analysis showed a reduction in scale particle size after the addition of inhibitor, with the mean value decreasing from 7470.2 nm to 6699.8 nm and the median value decreasing from 7031.8 nm to 6730.2 nm, leading to the conclusion that palm shell liquid smoke inhibitor is capable of inhibiting the growth of calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>) scale.

Keywords: liquid smoke, palm kernel shell, CaSO<sub>4</sub>, inhibitor, scale

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS  
ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI  
INHIBITOR KERAK KALSIUM SULFAT (CaSO<sub>4</sub>)  
MENGUNAKAN METODE *UNSEEDED*  
*EXPERIMENT***

**Oleh**

**Kadek Wendi Septiani**

**Skripsi**

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

**Pada**

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



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

Judul Penelitian : **STUDI PENGARUH SUHU PADA PROSES  
PIROLISIS ASAP CAIR DARI CANGKANG  
KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR  
KERAK KALSIMUM SULFAT (CaSO<sub>4</sub>)  
MENGUNAKAN METODE *UNSEEDED  
EXPERIMENT***

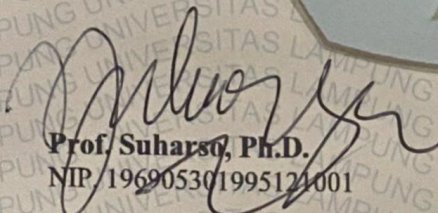
Nama Mahasiswa : **Kadek Wendi Septiani**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2217011018**

Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



  
**Prof. Suharsa, Ph.D.**  
NIP. 196905301995121001

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

2. **Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung**

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

**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

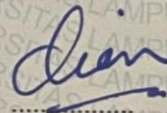
Ketua : Prof. Ir. Suharso, Ph.D.



Sekretaris : Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.



Anggota : Dr. Dian Herasari, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Hen Satria, S.Si., M.Si.  
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 10 Juni 2026

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Kadek Wendi Septiani  
NPM : 22170110187  
Jurusan : Kimia  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Unseeded 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, 10 Juni 2026

Yang menyatakan,



Kadek Wendi Septiani  
NPM. 2217011018

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Kadek Wendi Septiani, lahir di Swastika Buana pada tanggal 24 September 2004. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, putri dari pasangan Bapak Nyoman Sudira dan Ibu Komang Ratna Wati. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Swastika Buana pada tahun 2010-2016. Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Rumbia pada tahun 2016-2019. Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Seputih Banyak yang di selesaikan pada tahun 2019-2022. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menempuh studi di Program Studi Kimia FMIPA Universitas Lampung, penulis aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Hindu Universitas Lampung menjadi Bendahara Umum periode kepengurusan 2024-2025, pada periode 2022-2023 dan 2023-2024 menjadi salah satu anggota dari bidang Kewirausahaan. Selain itu, penulis juga pernah menjadi anggota Kesatuan Mahasiswa Hindu Dharma Indonesia (KMHDI) PC Bandar Lampung pada periode 2022-2024. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan pengabdian kepada masyarakat “UKM Hindu *Goes to Village*” di Desa Purwokencono, Lampung Timur, pada tahun 2024 dan Pada tahun 2025 di Desa Purwosari, Lampung Timur, selain itu penulis juga melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT Pertamina Lubricants Cilacap 06 Januari hingga 14 Februari 2025. Selanjutnya, pada tahun 2025 penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Kelurahan Kemiling Raya. Pada tahun 2025, penulis

juga pernah berperan sebagai asisten praktikum dalam mata kuliah wajib Praktikum Kimia Anorganik II di Jurusan Kimia. Penulis menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung dengan judul “Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”.

## **MOTTO**

“Berserah diri dengan tulus kepada Tuhan.”

**(Bhagavad Gita 18.66)**

“Suka dan duka datang silih berganti, hadapilah dengan keteguhan.”

**(Bhagavad Gita 2.14)**

" Teruslah berusaha membawa kebaikan melalui tindakan.”

**(Yajur Veda)**

“Tidak ada kekuatan yang melebihi kehendak Tuhan; manusia hanya wajib berusaha dengan tulus.”

**(Mahabharata)**

“Aku tidak kalah oleh keadaan, aku hanya sedang bertumbuh.”

**(Kadek Wendi Septiani)**

## **PERSEMBAHAN**

Puji syukur penulis panjatkan ke hadapan Ida Sang Hyang Widhi Wasa, dengan penuh rasa syukur dan dengan segala kerendahan hati penulis mempersembahkan skripsi ini kepada :

### **Bapak dan Mama Tercinta**

Karya sederhana ini penulis persembahkan untuk almarhum Bapak dan Mama, sosok luar biasa yang selalu menjadi sumber kekuatan dan penyemangat dalam hidup penulis. Untuk Bapak tercinta yang telah lebih dahulu berpulang, terima kasih atas cinta, nasihat, dan perjuangan yang selalu hidup dalam setiap langkah penulis; rindu ini akan selalu ada sebagai putri kecilmu. Untuk Mama tersayang, terima kasih atas segala pengorbanan, doa yang tak pernah putus, serta kasih sayang yang menguatkan hingga penulis mampu berada di titik ini. Semoga karya ini menjadi wujud bakti dan ungkapan terima kasih yang tulus.

### **I Gede Wibawa Putra dan Ni Gede Eka Saputri**

Terima kasih kepada kakak-kakakku tercinta yang selalu hadir memberikan motivasi, dukungan, serta kepercayaan bahwa setiap proses dan tantangan pasti dapat dilalui dengan baik.

Pembimbing penelitianku, **Bapak Prof. Suharso, Ph.D. dan Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.** serta penguji penelitianku **Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si.**

Terima kasih atas bimbingan, nasihat, dan ilmu yang diberikan selama masa perkuliahan.

Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas dedikasi, ilmu, dan bimbingan selama masa perkuliahan.

Sahabat-sahabat tercinta yang telah memberikan pengalaman, kebahagiaan, keceriaan, dan menjadi bagian terindah dalam perjalanan ini.

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadapan Ida Sang Hyang Widhi Wasa atas berkat rahmat, tuntunan, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Pengaruh Suhu Pemanasan pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”. Penyusunan skripsi ini dilakukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa karya ilmiah ini masih memiliki keterbatasan baik dari segi penyusunan maupun isi. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan di masa yang akan datang. Selama proses penelitian hingga penulisan skripsi ini, penulis memperoleh banyak dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dengan penuh rasa cinta dan kasih sayang, penulis mempersembahkan ungkapan terima kasih yang tulus kepada almarhum Bapak tercinta, I Nyoman Sudira yang telah lebih dahulu berpulang. Beliau adalah cinta pertama dan sosok yang begitu istimewa dalam hidup penulis, yang semasa hidupnya selalu menghadirkan doa, perhatian, dan kekuatan di setiap langkah. Meskipun raga beliau tak lagi kebersamaian, kenangan, nasihat, dan kasih sayangnya senantiasa hidup dalam hati. Sebagai putri kecilnya, penulis akan selalu merindukan sosok pelindung yang menjadi sumber semangat hingga terselesaikannya skripsi ini.
2. Dengan penuh rasa cinta, dan terima kasih yang tiada terhingga,

penulis mempersembahkan ungkapan syukur kepada mama tercinta, Komang Ratna Wati, pintu surgaku, sosok separuh nyawaku, panutan sekaligus tulang punggung dalam kehidupan penulis.

Terima kasih atas setiap doa yang tak pernah terputus, kasih sayang yang tulus, pengorbanan yang tak terhitung, serta kekuatan yang selalu mama berikan di setiap langkah perjuangan penulis.

Kehadiran mama menjadi sumber semangat dan tempat pulang yang paling hangat, hingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

3. Dengan penuh rasa terima kasih, penulis juga menyampaikan penghargaan kepada kakak tercinta dan mba ipar tersayang yang selalu memberikan dukungan, perhatian, serta semangat kepada penulis dalam setiap proses perjuangan. Terima kasih atas doa, motivasi, dan kebersamaan yang menjadi penguat di saat suka maupun duka, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Semoga segala kebaikan, kasih sayang, dan ketulusan yang diberikan senantiasa mendapat balasan yang terbaik.
4. Keluarga besar wayah nesa dan keluarga besar wayah kenul, terima kasih karena selalu mendoakan dan memberikan dukungan serta motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
7. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
8. Bapak Prof. Suharso, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I, sosok yang sangat baik. Terimakasih karena Bapak telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, ilmu, serta motivasi dengan penuh kesabaran sejak tahap perencanaan penelitian hingga penyusunan skripsi penulis dapat terselesaikan dengan baik.
9. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II,

terima kasih atas segala saran, masukan, dan bimbingan yang sangat berharga, serta perhatian yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan skripsi penulis dapat terselesaikan dengan baik.

10. Ibu Dr. Dian Herasari, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji yang memberikan saran, arahan, kritik dan motivasi terkait penyelesaian skripsi penulis.
11. Ibu Prof. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan serta dukungan kepada penulis selama menjalani perkuliahan sejak awal masa studi di jurusan kimia.
12. Bapak dan Ibu Dosen di Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu kepada penulis, serta Mba Liza selaku Staff Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik yang telah menyediakan alat-alat penelitian sehingganya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.
13. Teman-teman kimia Angkatan 22 terutama untuk kelas B, terima kasih atas kebersamaan yang diberikan selama masa perkuliahan.
14. Rekan seperjuangan, seperbimbingan *Suharso's Research*, Tegar, Agung, Yenally, Khansa, Widia, Bunga, terima kasih atas kerja sama, kebersamaan, dukungan, serta berbagai pengalaman berharga yang telah dilalui bersama, baik di laboratorium maupun di luar kegiatan penelitian. Semangat saling membantu, berbagi ilmu, dan motivasi yang diberikan menjadi bagian penting dalam perjalanan penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
15. Teruntuk Agung sebagai teman seperbimbingan sekaligus seperjuangan penulis yang menemani setiap babak dalam perjalanan panjang ini. Dari langkah pertama yang penuh ketidakpastian, begadang mempersiapkan seminar bersama, hingga detik-detik terakhir terselesaikannya skripsi ini. Penyemangat di saat langkah terasa berat, ke mana pun persiapan ini membawa kita, kamu selalu hadir tanpa perlu diminta. Terima kasih atas kebersamaan, motivasi, dan semua hal kecil yang ternyata berarti besar. Semoga perjalanan kita ke depan juga selalu dipermudah dalam pencapaiannya.

16. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Rara Cahyani, teman sejak awal perkuliahan yang telah menjadi bagian dari perjalanan akademik penulis. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, cerita, serta semangat yang selalu diberikan sejak masa-masa awal menjadi mahasiswa hingga proses penyusunan skripsi ini. Kehadiranmu menjadi warna tersendiri dalam setiap langkah perjuangan, baik dalam suka maupun duka, yang tidak akan pernah penulis lupakan.
17. TRJ (Ades, Mbawen, Wawak, Iki, Bedul, Ose, dan Rama) teman seperjuangan penulis, terima kasih selalu menjadi tempat berpulang ternyaman untuk bercerita suka maupun duka penulis, memberi semangat, dukungan, serta motivasi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
18. Sahabat- sahabat penulis semasa kuliah, Cicik, Wenik, Wawak, Teteh, Ajenk, Kaknan, Maul, Sakhi, Teli, Cindy, dan Ucik, terima kasih telah menjadi sahabat penulis yang selalu mau mendengarkan keluh kesah penulis dan selalu memberi semangat kepada penulis sehingganya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
19. Keluarga UKM Hindu Unila, terima kasih karena sudah menjadi rumah kedua bagi penulis di perantauan ini sehingganya penulis dapat merasakan pulang ternyaman selama masa perkuliahan.
20. Prestiku, Krisna, Darma, dan Irany, atas segala kerjasama, bantuan, dukungan dan waktu kita habiskan bersama dirumah kedua kita. Terima kasih telah menjadi tempat pulang ternyaman penulis selain keluarga dalam bercerita suka maupun duka.
21. Adik UKM, Dedek, Omang, Dekdita, dan Deknita, atas segala perayaan dalam setiap momentnya. Terima kasih telah menjadi adik di UKM yang cinta dan kasih sayangnya selalu tulus kepada penulis sehingga penulis merasakan memiliki adik yang tidak hanya sekedar adik diorganisasi melainkan sudah seperti keluarga sendiri. Kalian yang selalu berhasil menghangatkan hati penulis, bahkan di hari-hari yang paling melelahkan sekalipun. Tidak pernah ada kata menolak atau menghidar ketika penulis membutuhkan peran kalian, sekalipun kalian

memiliki kesibukan lain, kalian selalu bisa dan ada untuk penulis.

Semoga selalu diberikan kelancaraan dan kesuksesan kedepannya untuk kita semua.

22. Teman-teman KKN Kemiling Raya, terima kasih atas kebersamaannya selama menjalankan untuk menuntaskan salah satu mata kuliah wajib yang harus diselesaikan.
23. Seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini dari awal sampai dengan skripsi ini terselesaikan.

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xxi</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian.....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik .....	6
2.2. Kerak .....	8
2.3. Pembentukan Kerak .....	9
2.4. Faktor Pembentukan Kristal.....	11
2.5. Kalsium Sulfat (CaSO <sub>4</sub> ) .....	15
2.6. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak CaSO <sub>4</sub> .....	16
2.7. Mekanisme Penghambatan.....	18
2.7.1. Penghambat Ambang Batas .....	18
2.7.2. Khelat .....	19
2.7.3. Distorsi Kristal .....	20
2.7.4. Dispersi Kristal.....	20
2.8. Tanaman Kelapa Sawit.....	21
2.9. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit .....	23
2.10. Metode <i>Unseeded Experiment</i> .....	25
2.11. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat (CaSO <sub>4</sub> ).....	25
2.11.1. Spektrofotometer <i>Infra Red</i> (IR).....	26
2.11.2. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	27
2.11.3. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA).....	28
2.11.4. <i>Gas Chromatography-Mas Spectrometry</i> (GC-MS).....	30
2.11.5. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	30

<b>III. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>32</b>
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	32
3.2. Alat dan Bahan .....	32
3.3. Prosedur Penelitian.....	33
3.3.1. Pembuatan Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit .....	33
3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit .....	33
3.3.3. Pengujian Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dalam Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) .....	34
3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Kerak $\text{CaSO}_4$ tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Unseeded</i> <i>Experiment</i> .....	34
3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 300, 400, dan 500 °C dengan Menggunakan Metode <i>Unseeded</i> <i>Experiment</i> .....	35
3.3.3.3. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300, 400, dan 500 °C pada Sistem dengan Laju Alir menggunakan Kupon Logam.....	34
3.3.4. Analisis Data .....	37
3.3.5. Diagram Alir .....	38
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>39</b>
4.1. Pembuatan dan Analisis Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit...	40
4.2. Uji Ketahanan Larutan Pertumbuhan .....	43
4.3. Analisis Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan Spektrofotometer <i>Fourrier-Transform Infrared (FTIR)</i> .....	45
4.4. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS)</i> .....	51
4.4.1. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pada Suhu Pirolisis 300 °C.....	51
4.4.2. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pada Suhu Pirolisis 400 °C.....	54
4.4.3. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pada Suhu Pirolisis 500 °C.....	56
4.5. Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan terhadap Berat Endapan Kerak $\text{CaSO}_4$ Tanpa Penambahan Inhibitor dengan Kertas Saring menggunakan Metode <i>Unseeded Experiment</i> .....	59
4.6. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor menggunakan Metode <i>Unseeded Experiment</i> ....	60
4.6.1. Penentuan Efektivitas Inhibitor Terhadap Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300 °C.....	61
4.6.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor Terhadap Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cangkang Kelapa Sawit Hasil	

Pirolisis Suhu 400 °C.....	64
4.6.3. Penentuan Efektivitas Inhibitor Terhadap Kerak CaSO <sub>4</sub> dengan Penambahan Inhibitor Asap Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu 500 °C.....	68
4.6.4. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Asap Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300, 400, dan 500 °C.....	71
4.7. Analisis Efektivitas Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Pembentukan Kerak CaSO <sub>4</sub> pada Kupon Logam dengan Metode Sistem Laju Alir.....	76
4.7.1. Kupon Logam Pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,02 M dengan Penambahan Inhibitor 150 ppm dengan Variasi Suhu Pirolisis 300, 400, dan 500 °C .....	77
4.7.2. Kupon Logam Pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,05 M dan Konsentrasi Inhibitor 150 ppm Dengan Variasi Suhu Pirolisis 300, 400, dan 500 °C .....	78
4.8. Analisis Kerak Kalsium Sulfat CaSO <sub>4</sub> .....	80
4.9. Analisis Struktur Kerak Kalsium Sulfat CaSO <sub>4</sub> Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	82
4.10. Analisis Morfologi Kerak Kalsium Sulfat CaSO <sub>4</sub> Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	85
4.11. Analisis Distribusi Partikel Kerak Kalsium Sulfat CaSO <sub>4</sub> Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA) .....	87
4.12. Mekanisme Penghambatan Kerak Kalsium Sulfat CaSO <sub>4</sub> .....	89
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>93</b>
5.1. Simpulan.....	92
5.2. Saran.....	94
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>95</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>100</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi senyawa-senyawa asap cair cangkang kelapa sawit.....	24
2. Daerah serapan FTIR dari beberapa gugus fungsi .....	27
3. Nilai pH inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit.....	41
4. Hasil pirolisis asap cair cangkang kelapa sawit .....	42
5. Komposisi senyawa-senyawa asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 300 °C.....	47
6. Komposisi senyawa-senyawa asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 400 °C.....	48
7. Komposisi senyawa-senyawa asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 500 °C.....	49
8. Perbandingan gugus fungsi asap cair cangkang kelapa sawit pada suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C .....	50
9. Komponen-komponen kimia tertinggi pada asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 300 °C .....	52
10. Komponen-komponen kimia tertinggi pada asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 400 °C.....	55
11. Komponen-komponen kimia tertinggi pada asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 500 °C.....	57
12. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 300 °C pada variasi larutan pertumbuhan CaSO <sub>4</sub> .....	62
13. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 400 °C pada variasi larutan pertumbuhan CaSO <sub>4</sub> .....	66
14. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 500 °C pada variasi larutan pertumbuhan CaSO <sub>4</sub> .....	69
15. Perbandingan nilai persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit pada variasi suhu pirolisis .....	72
16. Nilai pH larutan pertumbuhan CaSO <sub>4</sub> sebelum dan sesudah penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit pada konsentrasi 150 ppm .....	74

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skematik proses pertukaran panas.....	7
2. Mekanisme pertumbuhan kristal .....	10
3. Tahapan kristalisasi .....	13
4. Diagram konsentrasi terhadap temperatur pembentukan inti kristal .....	14
5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ( $\diamond$ = bibit kristal, $\circ$ = inhibitor) .....	18
6. Mekanisme pencegahan kerak dengan penghambatan ambang batas, dispersi, dan modifikasi kristal .....	21
7. Skema kerja spektrofotometer <i>Infra Red</i> .....	26
8. Gambar SEM morfologi kristal $\text{CaSO}_4$ dengan 5000x pembesaran (a) tanpa inhibitor, (b) dengan inhibitor 50 ppm .....	28
9. Distribusi ukuran partikel $\text{CaSO}_4$ .....	29
10. Pola XRD kristal $\text{CaSO}_4$ .....	31
11. Diagram alir penelitian. ....	38
12. Pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit.....	40
13. Uji ketahanan larutan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 2000 ppm (a) suhu pirolisis 300 °C, (b) suhu pirolisis 400 °C, (c) suhu pirolisis 500 °C .....	43
14. Hasil analisis FTIR pada asap cair cangkang kelapa sawit (a) suhu pirolisis 300 °C, (b) suhu pirolisis 400 °C, (c) suhu pirolisis 500 °C .....	46
15. Hasil analisis GC-MS pada asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 300 °C .....	52
16. Hasil analisis GC-MS pada asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 400 °C .....	54

17. Hasil analisis GC-MS pada asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 500 °C .....	56
18. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO <sub>4</sub> tanpa penambahan inhibitor dengan berbagai variasi konsentrasi. ....	59
19. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO <sub>4</sub> dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 300 °C pada berbagai variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi inhibitor .....	61
20. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO <sub>4</sub> dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 400 °C pada berbagai variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi inhibitor .....	65
21. Grafik laju pertumbuhan kerak CaSO <sub>4</sub> dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit suhu pirolisis 500 °C pada berbagai variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi inhibitor .....	68
22. Diagram batang perbandingan efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 150 ppm pada suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C terhadap berbagai konsentrasi larutan pertumbuhan.....	72
23. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan 0,02 M (a) setelah pengujian tanpa inhibitor (b) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (c) dengan inhibitor 400 °C (d) dengan inhibitor 500 °C dengan konsentrasi inhibitor 150 ppm. ....	77
24. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan 0,05 M (a) setelah pengujian tanpa inhibitor (b) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (c) dengan inhibitor 400 °C (d) dengan inhibitor 500 °C dengan konsentrasi inhibitor 150 ppm. ....	79
25. Perbedaan larutan pertumbuhan CaSO <sub>4</sub> 0,03 M (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 150 ppm.....	81
26. Kerak CaSO <sub>4</sub> dengan konsentrasi larutan pertumbuhan 0,03 M (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 150 ppm.....	82
27. Difraktogram kerak CaSO <sub>4</sub> tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor (G = gipsum dan B = basanit) .....	83
28. Morfologi kerak CaSO <sub>4</sub> pada konsentrasi 0,03 M (a) tanpa inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 150 ppm.....	86
29. Distribusi ukuran partikel kerak CaSO <sub>4</sub> 0,03 M tanpa inhibitor dan dengan penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit dengan konsentrasi 150 ppm.....	88
30. Mekanisme penghambatan kerak CaSO <sub>4</sub> 0,03 M oleh inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit. ....	90

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Sebagian besar sektor industri di Indonesia, termasuk industri minyak dan gas, mengandalkan pipa sebagai saluran untuk mengalirkan fluida. Pergerakan fluida selama aliran melalui pipa dapat menjadi masalah yang serius karena seiring berjalannya waktu, dapat terjadi penumpukan kerak. Akumulasi kerak di dalam peralatan industri mengakibatkan penurunan efisiensi dan diameter pipa, yang pada gilirannya menyebabkan penyempitan jalur aliran fluida dan gangguan dalam proses produksi. Gangguan aliran fluida dapat menyebabkan peningkatan suhu dan tekanan, meningkatkan risiko kerusakan atau bahkan keretakan pada pipa (Suharso dan Buhani, 2015). Oleh sebab itu, biaya dan kerugian yang terjadi menjadi sangat besar, karena sebagian besar dana perawatan peralatan digunakan untuk mengganti atau memperbaiki bagian-bagian yang mengalami kerusakan akibat penumpukan kerak. Sehingga dibutuhkan adanya penanganan yang sesuai sebagai solusi mengurangi dampak merugikan dari permasalahan keberadaan kerak.

Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang mengendap serta membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Kerak terbentuk karena tercapainya keadaan larutan lewat jenuh, dalam keadaan larutan lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal dan yang memiliki muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuk kerak (Aditya, 2019). Pengerakan (*scaling*) merupakan gangguan pada membran yang disebabkan oleh pengendapan garam-garam

anorganik yang menempel dan membentuk lapisan pada permukaan membran. Pembentukan kerak pada aliran fluida di berbagai proses industri dapat menurunkan efisiensi sistem dan menimbulkan kerugian besar, sehingga diperlukan upaya untuk menghambat pertumbuhan kerak di dalam pipa. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti pengendalian pH, pelunakan air, dan penghilangan mineral dari air. Metode pengendalian pH umumnya dilakukan dengan penambahan asam berkonsentrasi tinggi, namun cara ini kurang efektif karena penggunaan asam pekat memiliki risiko tinggi dan dapat menimbulkan korosi serius pada peralatan (Raharjo, 2020). Sementara itu, metode pelunakan dan penghilangan mineral air memerlukan biaya operasional yang besar karena membutuhkan 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.

Metode penghambatan kerak dengan menggunakan inhibitor kerak menjadi metode yang dapat dikembangkan karena lebih efektif, stabil, dan biaya terjangkau. Inhibitor merupakan senyawa kimia yang pada 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.

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) merupakan salah satu komoditas pertanian yang vital bagi perekonomian Indonesia. Menurut data Departemen Pertanian Amerika Serikat, USDA, (2023) Indonesia merupakan produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia. USDA memperkirakan produksi CPO (*Crude Palm Oil*) di Indonesia dapat mencapai 45,5 juta Metrik Ton (MT) pada tahun 2022–2023. Tingginya kontribusi sektor kelapa sawit terhadap perekonomian nasional memerlukan pengelolaan pemeliharaan yang tepat untuk menjamin keberlanjutan

produktivitas (Lubis dkk., 2022). Kelapa sawit merupakan jenis perkebunan yang sedang dikembangkan di Provinsi Lampung, bagian dari tanaman kelapa sawit hampir semuanya dapat dimanfaatkan, salah satunya 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. 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 ( $\text{CaSO}_4$ ). 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, oleh karena itu, cangkang kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai asap cair. Senyawa fenolik pada cangkang kelapa sawit tersebut mengandung senyawa antioksidan yang dapat menghambat laju pertumbuhan kerak. Meninjau dari kandungan senyawa yang terdapat dalam asap cair cangkang kelapa sawit, maka asap cair cangkang kelapa sawit dapat dikembangkan menjadi inhibitor pada laju pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$  pada konsentrasi larutan pertumbuhan dan konsentrasi inhibitor yang berbeda.

Pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi tiga subkategori utama yaitu: pirolisis lambat, menengah dan cepat, tergantung pada laju pemanasan dan waktu tinggal. Suhu pemanasan merupakan salah satu parameter paling penting dalam proses pirolisis karena secara langsung memengaruhi laju dekomposisi termal bahan baku, komposisi produk, serta kualitas senyawa yang dihasilkan. Pada proses pirolisis cangkang kelapa sawit, variasi suhu menentukan proporsi antara asap cair, arang, dan gas, sekaligus memengaruhi kandungan senyawa aktif seperti asam organik, fenol, dan karbonil (Hasibuan *and* Pradede, 2023).

Berdasarkan uraian diatas, maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas penambahan asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor dengan menggunakan metode *unseeded experiment* pada pertumbuhan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Pada penelitian ini 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*), efektifitas inhibitor dalam menghambat pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  dengan metode *unseeded experiment* diketahui berdasarkan analisis data. Analisis dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi  $\text{CaSO}_4$ , 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. Mendapatkan pengaruh penggunaan asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor pada berbagai konsentrasi terhadap pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ).
2. Mendapatkan nilai efektivitas asap cair cangkang kelapa sawit dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) dengan menggunakan metode *unseeded experiment* melalui analisis data dan karakterisasi menggunakan FTIR, GC-MS, SEM, PSA, dan XRD.
3. Menganalisis hubungan antara suhu pirolisis, kandungan senyawa aktif asap cair (asam organik, fenol, karbonil), serta kemampuan inhibisinya terhadap  $\text{CaSO}_4$  yang diuji menggunakan metode *unseeded experiment*.

## 1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi mengenai pengaruh suhu pirolisis terhadap komposisi kimia asap cair cangkang kelapa sawit serta hubungannya dengan efektivitas penghambatan pembentukan kerak kalsium sulfat

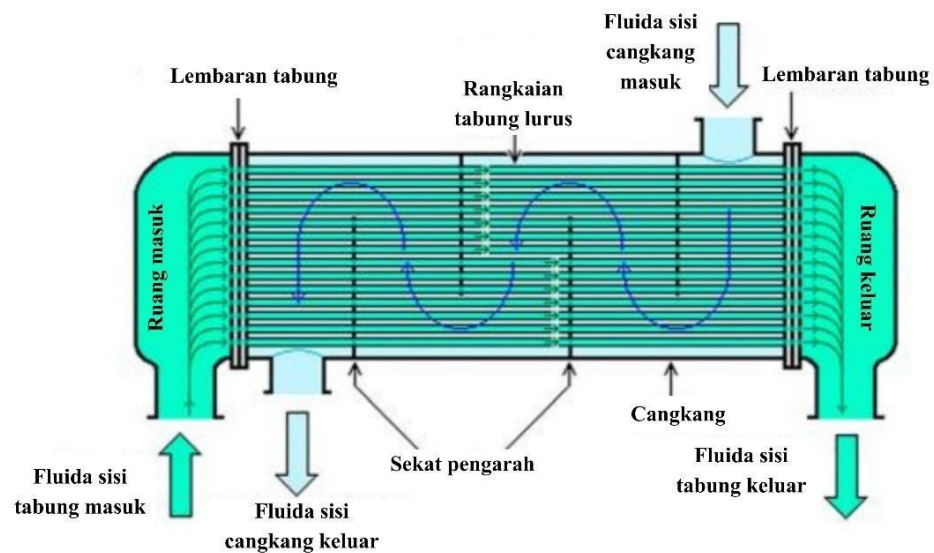
(CaSO<sub>4</sub>), sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi landasan untuk pengembangan lebih lanjut dalam upaya mencegah terjadinya kerak pada peralatan industri dan mengurangi dampak negatif yang terkait dengan masalah tersebut.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik

Telah banyak ditemui jenis endapan yang dihasilkan pada bidang perindustrian terutama industri minyak diantaranya, kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ), magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ), kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), serta barium sulfat ( $\text{BaSO}_4$ ). Endapan didefinisikan sebagai bentuk kristal yang menempel pada permukaan instrumen yang mengalami proses perpindahan panas. Endapan yang menempel pada instrumen dapat dilakukan proses penghilangan dengan cara pengeboran (*drilling*). Endapan yang terbentuk dari larutan disebabkan adanya proses penurunan kelarutan pada kenaikan suhu operasional dan kristal padat melekat erat pada permukaan logam. Endapan yang terbentuk dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yakni endapan alkali dan non alkali. Endapan alkali dipengaruhi oleh tingkat alkalinitas larutan sementara endapan non alkali dipengaruhi oleh konsentrasi larutan (Raharjo, 2020). Pengendapan mineral khususnya anorganik dapat dengan mudah terbentuk pada permukaan air yang mengalir ketika konsentrasi larutan memiliki kandungan ion terlarut yang tinggi. Endapan berupa senyawa-senyawa anorganik sering terjadi pada peralatan industri yang melibatkan penggunaan air garam seperti industri minyak dan gas, proses desalinasi dan ketel serta industri kimia (Ekananda *et al.*, 2019). Dalam hal tersebut maka unsur-unsur anorganik seperti logam kalsium (Ca) dalam jumlah yang melebihi kadar kelarutannya dalam kondisi setimbang dapat menjadi unsur pembentuk suatu kerak. Terjadinya penumpukan endapan yang berasal dari senyawa anorganik dapat menimbulkan masalah seperti kerak (Suharso *et al.*, 2010).

Pemanfaatan air sebagai media pendingin untuk menghilangkan panas yang tidak diinginkan dari proses perpindahan panas pada berbagai peralatan seperti alat penukar panas, kondensator, evaporator, sistem pendingin, dan dinding pipa yang digunakan dalam sistem pendinginan. Pendinginan dengan menggunakan air ini dilakukan dengan mengalirkan air ke seluruh tabung yang terkena proses panas, sehingga air yang sebelumnya panas akan menjadi dingin melalui proses penguapan dalam *cooling tower*. Air yang telah mengalami penurunan suhu lalu digunakan untuk siklus pendinginan selanjutnya. Adapun skematik proses pertukaran panas pada sistem pendinginan ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Skematik proses pertukaran panas (Wang *et al.*, 2021)

supersaturasi karena adanya mineral terlarut seperti magnesium, karbonat, sulfat, fosfat logam silikat/silika, dan besi yang dipengaruhi oleh naik-turunnya suhu secara tiba-tiba pada permukaan alat penukar panas saat air bersentuhan dengan permukaan (Mustain dkk., 2019). Pada Gambar 1 menunjukkan skematik proses pertukaran panas pada sistem pendinginan dapat dilakukan secara berulang (Wang *et al.*, 2021).

## 2.2. Kerak

Kerak merupakan hasil dari penumpukan keras bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air yang biasa ditemui di industri minyak dan aliran cairan pada sistem industri lainnya (Raharjo, 2020). Kerak terbentuk karena tercapainya keadaan larutan lewat jenuh, dalam keadaan larutan lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal. Inti kristal ini akan terlarut kembali jika ukurannya lebih kecil dari ukuran partikel kritis sementara itu kristal-kristal akan berkembang bila ukurannya lebih besar dari partikel kritis. Apabila ukuran inti kristal menjadi lebih besar dari inti kritis, maka akan mulailah pertumbuhan kristal, dari kristal kecil membentuk kristal dengan ukuran yang lebih besar (penebalan lapisan kerak). Kristal-kristal yang terbentuk mempunyai muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuklah kerak (Aditya, 2019).

Pengerakan termasuk dalam proses alami yang terjadi karena adanya reaksi kimia antara kandungan-kandungan yang tidak dikehendaki yang terdapat dalam air. Kandungan yang dimaksudkan meliputi alkalin, kalsium, klorid, sulfat, nitrat, dan lain-lain. Pembentukan kerak pada dasarnya merupakan fenomena pengkristalan yang dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor tersebut diantaranya kondisi larutan lewat jenuh, laju alir, temperatur, dan kehadiran pengotor juga aditif (Ekananda *et al.*, 2019).

Kerak juga dapat terbentuk disebabkan oleh faktor yang mempengaruhinya seperti terdapat campuran air yang digunakan tidak sesuai. Campuran dianggap tidak sesuai ketika air ini berinteraksi secara kimia dan mineralnya mengendap ketika dicampurkan. Endapan tersebut dapat menggumpal dan membentuk lapisan kristal. 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  $\text{Ca}^{2+}$  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).

### 2.3. Pembentukan Kerak

Pembentukan kerak pada dasarnya merupakan fenomena pengendapan yang dipengaruhi oleh berbagai parameter seperti kadar air, kondisi larutan lewat jenuh, laju alir, temperatur, lama pengaliran, tipe dan jenis pengotor (*impurity*), jumlah mineral, pH, dan faktor lainnya. Ketika kadar dan ukuran parameter tersebut dirubah, maka keseimbangan (*equilibrium*) sistem akan bergeser dan keadaan yang demikian dapat memicu sistem untuk melepaskan ion dan akhirnya terbentuklah kerak (Raharjo, 2020). Kerak terbentuk ketika larutan mencapai keadaan larutan lewat jenuh, dalam keadaan larutan lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal. Inti kristal kemudian larut kembali menjadi ukuran lebih kecil daripada ukuran partikel kritis. Kristal-kristal yang terbentuk memiliki muatan ion yang lebih rendah sehingga cenderung akan menggumpal membentuk kerak (Suharso dan Buhani, 2015). Menurut Speight (2016), proses pengendapan kerak dapat terjadi melalui 3 tahap, yaitu:

#### 1. Pembentukan Inti (Nukleasi)

Pada tahap nukleasi, terjadi pembentukan inti kristal yang berupa partikel halus sehingga tidak mengalami pengendapan selama proses aliran. Inti ini dapat terbentuk dari molekul atau ion yang merupakan bagian dari endapan, yang tumbuh bersamaan dengan jarak yang dekat. Inti ini juga dapat juga dikatakan sebagai partikel halus secara kimia tidak berhubungan dengan endapan, tetapi memiliki kesamaan dengan struktur kisi kristal.

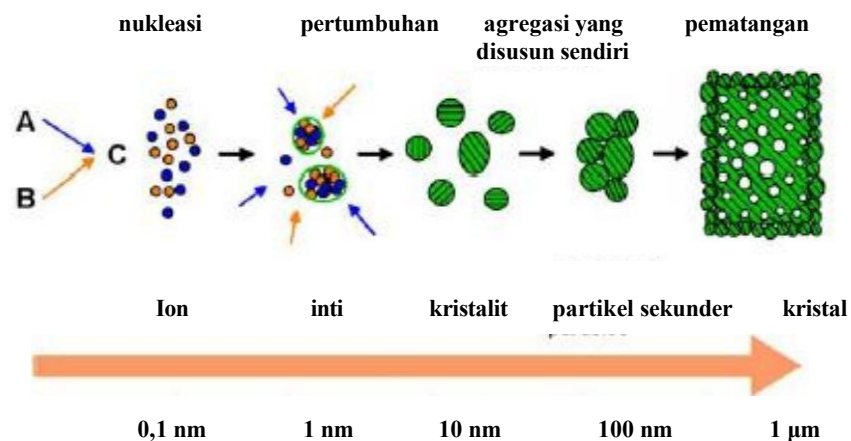
#### 2. Pertumbuhan Kristal

Dalam tahap pertumbuhan kristal, kristal terbentuk dari lapisan ion komponen endapan pada permukaan inti karena tidak mencapai kesetimbangan dalam

proses pengolahan air yang melibatkan proses pengendapan. Inti akan tumbuh menjadi butiran yang lebih besar dengan diameter awal antara 0,001-0,1  $\mu$  (ukuran koloid), kemudian tumbuh lagi hingga diameter 0,1-10  $\mu$  (kristal halus). Kristal akan mulai mengendap ketika pertumbuhannya mencapai diameter lebih dari 10  $\mu$  (kristal kasar).

### 3. Tahap Pengendapan

Pengendapan akan menghasilkan materi padatan dan mungkin bukan bentuk padatan yang paling stabil untuk berbagai kondisi reaksi dan selama jangka waktu tertentu struktur kristal endapan dapat berubah menjadi fasa yang stabil. Pematangan juga dipengaruhi oleh ukuran kristal endapan yang meningkat karena partikel yang lebih kecil memiliki energi permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang lebih besar. Konsentrasi larutan dalam kesetimbangan untuk partikel yang lebih besar akan sebanding untuk partikel yang lebih besar. Oleh karena itu, partikel yang lebih besar terus tumbuh dalam berbagai ukuran partikel karena larutan masih dalam keadaan yang lewat jenuh. Partikel yang lebih kecil melarut, sebab konsentrasi larutan saat ini belum diketahui batas jenuhnya. Mekanisme pertumbuhan kristal dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Mekanisme pertumbuhan kristal (Dera, 2018)

### 4. Attachment ke permukaan

Tidak semua kerak yang terbawa ke permukaan akan langsung melekat. Gaya-gaya yang bekerja saat partikel mendekati permukaan sangat menentukan

dalam proses ini. Karakteristik partikel seperti kerapatan, elastisitas, sifat permukaan, dan kondisi fisiknya, serta sifat permukaan tempat melekat seperti tingkat kekasaran dan jenis materialnya, turut berperan penting dalam menentukan efektivitas proses pelepasan atau *removal* partikel tersebut.

#### 5. *Removal* dari permukaan

Kristal yang tidak mengalami *attachment* ke permukaan dapat mengalami *removal*. Partikel kristal yang terlepas dari permukaan dapat dihilangkan melalui beberapa mekanisme, seperti spalling akibat gaya geser dan semburan turbulen, pelarutan kembali material deposit, serta proses erosi. Kecepatan aliran dan tingkat kekasaran permukaan juga berpengaruh terhadap efektivitas *removal* kristal dari permukaan. Terbentuknya deposit material bisa terjadi jika pH aliran cairan berubah, baik karena penambahan aditif maupun cara lain. Selain itu, pengikisan partikel kristal dapat membantu mengurangi materi pada lapisan pergerakan.

#### 6. *Aging* deposit

Ketebalan deposit bertambah seiring waktu hingga mencapai nilai stabil dan kekuatan mekanik deposit dapat berubah dengan waktu karena perubahan dalam struktur kristal atau komposisi kimia dari deposit. Penuaan atau *aging* dapat memperkuat atau memperlemah deposit kerak. Kondisi ini mendukung pertumbuhan partikel kristal kerak ketika larutan mencapai tingkat kejenuhan tertentu sehingga memicu proses nukleasi. Air dapat membawa senyawa seperti silikat, kalsium sulfat, magnesium karbonat, dan kalsium karbonat yang kemudian mengendap dan membentuk lapisan kerak. Perubahan ini umumnya terjadi pada peralatan proses seperti boiler, evaporator, penukar panas, dan menara pemanas.

### 2.4. Faktor Pembentukan Kristal

Faktor utama berpengaruh terhadap pembentukan, pertumbuhan serta pengendapan kerak antara lain adalah perubahan kondisi reservoir penurunan tekanan reservoir dan perubahan temperatur, pencampuran dua jenis air yang

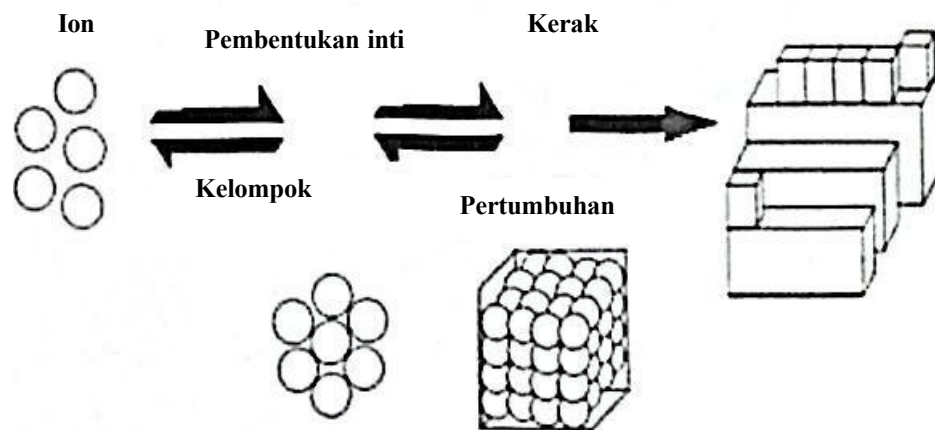
mempunyai susunan mineral tidak sesuai, adanya supersaturasi, penguapan akibat dari perubahan konsentrasi, pengadukan (agitasi, pengaruh dari turbulensi), waktu kontak antara kerak dengan permukaan pipa serta perubahan pH air. Mekanisme pembentukan endapan kerak berkaitan erat dengan komposisi air di dalam formasi. Secara umum, air mengandung ion-ion terlarut, baik itu berupa kation ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$ ), maupun anion ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , dan  $\text{CO}_3^{2-}$ ). Kation dan anion yang terlarut dalam air akan membentuk senyawa yang mengakibatkan terbentuknya kristal. Kelarutan didefinisikan sebagai batas suatu zat yang dapat dilarutkan dalam zat pelarut pada kondisi fisik tertentu (Raharjo, 2020).

Kristal terbentuk dari zat cair melalui proses pemadatan. Kristal yang terbentuk saat proses pengendapan memiliki ukuran yang dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu laju pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal. Laju pembentukan inti dapat diukur dengan jumlah inti yang terbentuk dalam periode waktu tertentu. Ketika laju pembentukan inti tinggi, maka akan terbentuk banyak kristal yang terdiri dari partikel-partikel kecil. Laju pembentukan inti bergantung pada derajat lewat jenuh dari suatu larutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuhnya maka akan semakin besar kemungkinan untuk terbentuknya inti baru sehingga laju pembentukan inti pun akan semakin meningkat. Sementara itu, laju pertumbuhan kristal juga merupakan faktor penting yang memengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan. Semakin tinggi laju pertumbuhan, maka kristal yang terbentuk akan semakin besar. Laju pertumbuhan kristal juga dipengaruhi oleh derajat lewat jenuh dari suatu larutan (Svehla, 1990). Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan kristal sebagai berikut:

#### 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 memiliki dua tahap proses, yaitu tahap pembentukan inti yang merupakan tahap mulai terbentuknya zat padat baru, dan tahap pertumbuhan kristal yang merupakan tahap inti zat padat yang baru

terbentuk mengalami pertumbuhan menjadi kristal yang lebih besar. Tahap pembentukan kristal sangat dipengaruhi oleh kondisi seperti suhu, tingkat saturasi, dan ketersediaannya zat terlarut (Rahmadina dkk., 2020). Gambaran berupa proses pembentukan kristal ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Tahapan kristalisasi (Suharso dan Buhani, 2015)

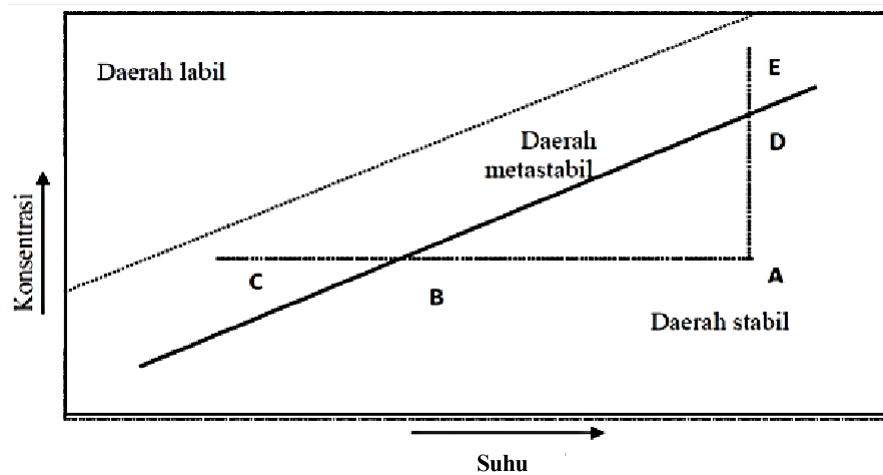
## 2. Kelarutan endapan

Kelarutan dapat dipengaruhi oleh sifat serta konsentrasi zat-zat lain, terutama ion-ion yang hadir dalam campuran tersebut. Terdapat perbedaan yang signifikan dalam dampak ion yang sejenis dan ion asing, ion sejenis adalah ion yang merupakan bagian dari salah satu zat dalam endapan. Jika terdapat jumlah berlebihan dari ion yang sama, maka kelarutan endapan dapat berkurang, meskipun dampak ini mungkin dapat diimbangi dengan pembentukan kompleks yang dapat meningkatkan kelarutan dengan ion yang berlebihan tersebut. Keberadaan ion asing dapat meningkatkan kelarutan endapan, tetapi peningkatan ini biasanya hanya sedikit, kecuali jika terjadi reaksi kimia seperti pembentukan kompleks atau reaksi asam-basa antara endapan dan ion asing. Dalam kasus reaksi kimia tersebut, peningkatan kelarutan dapat menjadi lebih besar (Suharso dan Buhani, 2015).

## 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). Larutan lewat jenuh dapat terbentuk melalui beberapa cara, termasuk pendinginan dari larutan yang kaya zat terlarut, penguapan dari larutan yang lebih encer, kombinasi proses penguapan dan pendinginan, serta dengan menambahkan zat lain untuk menurunkan kelarutannya. Diagram hubungan temperatur dengan konsentrasi dalam proses kristalisasi dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Diagram konsentrasi terhadap temperatur pembentukan inti kristal (Suharso dan Buhani, 2015)

Terdapat faktor-faktor lain yang mempengaruhi terbentuknya kerak atau kristal diantaranya:

1. Kualitas air

Pembentukan kerak dipengaruhi oleh konsentrasi komponen-komponen pembentuk kerak (kesadahan kalsium, konsentrasi fosfat), pH, dan konsentrasi bahan penghambat kerak dalam air.

2. Temperatur air

Pada umumnya komponen pembentuk kerak cenderung mengendap atau menempel sebagai kerak pada temperatur tinggi. Hal ini disebabkan karena kelarutannya menurun dengan naiknya temperatur. Laju pergerakan mulai meningkat pada temperatur air 50 °C atau lebih dan kadang-kadang kerak

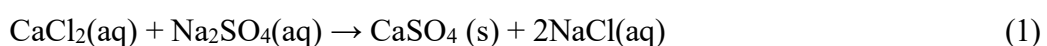
terbentuk pada temperatur air diatas 60 °C.

### 3. Laju alir air

Laju pembentukan kerak akan meningkat dengan turunnya laju alir sistem. Dalam kondisi tanpa pemakaian penghambat kerak, pada sistem dengan laju alir 0,6 m/detik maka laju pembentukan kerak hanya sepertima dibanding pada laju alir air 0,2 m/detik.

## 2.5. Kalsium Sulfat (CaSO<sub>4</sub>)

Kalsium sulfat merupakan garam kalsium yang berbentuk serbuk putih, tidak berbau, atau berwarna. Bentuk kristal kalsium sulfat kadang-kadang memiliki semburat biru, abu-abu atau kemerahan atau bisa merah bata. Kalsium sulfat memiliki massa jenis 2,96 g/cm<sup>3</sup>, berat molekul 136,134 g/mol, titik leleh 2840 °F dan kelarutan dalam air 2 g/L pada suhu 25 °C. CaSO<sub>4</sub>, merupakan salah satu jenis kerak non alkali. Kerak ini dikenal dengan tiga bentuk yaitu anhidrat (CaSO<sub>4</sub>) stabil pada suhu 98 °C, hemihidrat (CaSO<sub>4</sub>.0,5 H<sub>2</sub>O) stabil pada suhu antara 98-170 °C, dan dihidrat (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O). Berbagai kalsium sulfat ini terbentuk karena adanya perbedaan temperatur dan konsentrasi air laut. Pada air sirkulasi dengan kesadahan kalsium tinggi, kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O) dapat terendapkan sesuai dengan temperatur air. Kelarutan CaSO<sub>4</sub>, bertambah dengan naiknya temperatur sampai 37 °C, kemudian cenderung menurun pada temperatur di atas 37 °C. Kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) umum ditemukan dalam industri minyak serta sektor lainnya. Pembentukan kerak CaSO<sub>4</sub> terjadi melalui reaksi antara ion kalsium (Ca<sup>2+</sup>) dari CaCl<sub>2</sub> dan ion sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dari Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang tidak larut dalam air. Pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) pada sistem larutan dapat dijelaskan melalui reaksi pengendapan antara ion kalsium (Ca<sup>2+</sup>) dan ion sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Secara umum, proses ini terjadi ketika larutan yang mengandung kalsium klorida (CaCl<sub>2</sub>) bereaksi dengan natrium sulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), menghasilkan endapan kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) dan natrium klorida (NaCl) seperti ditunjukkan pada Persamaan (1).



Reaksi ini kemudian dapat disederhanakan menjadi interaksi langsung antara ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  yang membentuk endapan  $\text{CaSO}_4$  sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).



(Suharso dan Buhani, 2015).

Kerak kalsium sulfat merupakan endapan senyawa  $\text{CaSO}_4$  (kalsit) yang terbentuk dari hasil reaksi antara ion kalsium (Ca) dengan ion sulfat (SO) ataupun dengan ion bisulfat ( $\text{HSO}_4$ ). Kalsium membentuk kerak kuras ketika berkombinasi dengan sulfat. Kerak  $\text{CaSO}_4$ , kemudian dapat dihindari jika suhu operasi dipertahankan dibawah suhu  $421\text{ }^\circ\text{C}$  dan dengan memberikan inhibitor kerak (Suharso dan Buhani, 2015) Kristal kalsium sulfat terdiri dari beberapa fasa diantaranya adalah fasa 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 ( $\text{CaSO}_4$ ), Fasa gipsum merupakan jenis fasa *hardscale* dan fasa basanit merupakan jenis fasa *softscale* serta fasa anhidrit merupakan jenis fasa *softscale*. Fasa gipsum (*hardscale*) merupakan jenis kristal yang sulit dihilangkan sedangkan fasa basanit dan anhidrit (*softscale*) merupakan kristal yang mudah lepas dari pipa atau mudah untuk dihilangkan. Ketiga fasa tersebut memiliki bentuk seperti batang (Raharjo, 2020).

## 2.6 Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak $\text{CaSO}_4$

Beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terbentuknya kerak  $\text{CaSO}_4$  pada peralatan-peralatan industri antara lain:

### 1. Pengendalian pH

Pengendalian pH dengan penginjeksian asam (asam sulfat atau asam klorida) telah lama diterapkan untuk mencegah pengendapan oleh garam-garam kalsium, garam logam bivalen dan garam fosfat. Kelarutan hahan pembentukan kerak biasanya meningkat pada pH yang lebih rendah. Pada pH 6,5 atau kurang, korosi pada baja karbon, tembaga dan paduan tembaga dengan cepat akan berlangsung dan pH efektif untuk mencegah pengendapan kerak hanyalah pada

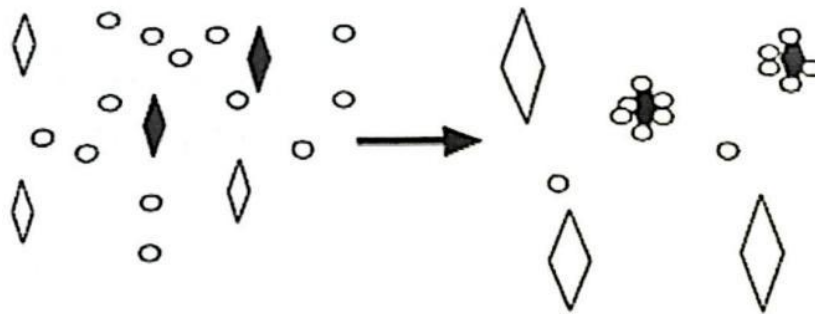
pH 7,0 sampai 7,5. Oleh karena itu, suatu sistem otomatis penginjeksian asam diperlukan untuk mengendalikan pH secara tepat. Lagipula, asam sulfat dan asam klorida mempunyai tingkat bahaya yang cukup tinggi dalam penanganannya. Saat ini penghambatan kerak dengan hanya menginjeksikan asam semakin jarang digunakan (Raharjo, 2020).

## 2. Penggunaan Inhibitor Kerak

Inhibitor kerak umumnya merupakan senyawa kimia yang ditambahkan dalam jumlah kecil ke dalam air untuk mencegah atau menghambat pembentukan kerak. Mekanisme kerjanya didasarkan pada kemampuan inhibitor membentuk senyawa kompleks dengan unsur penyusun kerak, sehingga proses pengendapan dapat dicegah. Secara kimia, inhibitor kerak dibagi menjadi dua jenis, yaitu inhibitor termodinamika dan inhibitor kinetika. Inhibitor termodinamika berfungsi sebagai zat pengompleks atau agen khelat yang mampu berikatan dengan ion penyusun kerak, sehingga mencegah terbentuknya dan mengendapnya kristal. Namun, efektivitasnya terbatas pada kondisi air dengan konsentrasi garam rendah. Sementara itu, inhibitor tipe kinetika bekerja dengan cara memperlambat laju pembentukan kerak melalui pengaruh terhadap proses nukleasi, pertumbuhan kristal, serta memungkinkan terjadinya kondisi supersaturasi tanpa pembentukan kerak (Husna *et al.*, 2022). Kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) 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).

Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dapat diilustrasikan pada Gambar 5. Gambar 5 memberikan gambaran bagaimana kerja inhibitor dalam mengadsorpsi pada sisi-sisi pertumbuhan kristal dari bibit kristal (ditunjukkan pada kristal yang diberi warna hitam) yang mengakibatkan

pertumbuhan kristal menjadi terhambat. Sementara itu, pada bibit kristal yang tidak teradsorpsi oleh inhibitor (ditunjukkan pada kristal yang tidak diberi warna) mengalami pertumbuhan normal (Suharso *et al.*, 2014).



**Gambar 5.** Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan ( $\diamond$  = bibit kristal,  $\circ$  = inhibitor) (Suharso *et al.*, 2014)

## 2.7. Mekanisme Penghambatan

Salah satu metode yang efektif untuk mencegah pembentukan kerak dalam pipa adalah dengan menggunakan inhibitor kerak. Terdapat empat mekanisme utama yang bekerja selama proses pelarutan dan penghambatan pertumbuhan kristal, diantaranya sebagai berikut:

### 2.7.1. Penghambat Ambang Batas

Inhibitor ambang batas merupakan senyawa kimia yang bekerja pada tingkat sub stoikiometri untuk mempertahankan kelarutan ion mineral meskipun konsentrasinya telah melebihi batas jenuh normal (Stamatakis *et al.*, 2006). Mekanisme kerjanya adalah dengan mencegah terbentuknya nukleasi awal, sehingga menghambat pengendapan lebih lanjut. Inhibitor ini mengganggu penggabungan ion-ion agar tidak mencapai ukuran kritis yang diperlukan untuk

nukleasi, dengan cara membatasi posisi pertumbuhan kristal. Akibatnya, inhibitor memisahkan dan melepaskan ion-ion selama proses penghambatan berlangsung. Proses ini dikendalikan oleh faktor kinetika, bukan efek termodinamika. Inhibitor ambang batas bekerja melalui mekanisme adsorpsi stereospesifik pada bidang kristalografi dari inti kristal yang sedang tumbuh (Zhao *et al.*, 2024). Adsorpsi ini mempengaruhi struktur kristal dan secara termodinamika mendorong kristal untuk larut kembali, bukan terus bertumbuh. Mekanisme semacam ini umumnya efektif untuk molekul-molekul berukuran kecil.

Jenis inhibitor yang umum digunakan untuk membatasi kerak adalah senyawa mengandung fosfor, seperti polifosfat anorganik, ester fosfat organik, fosfonat organik, dan fosfat amino organik. Selain itu, senyawa seperti aminopolikarboksilat, fosfonopolikarboksilat, dan sulfonat juga dikenal sebagai inhibitor yang efektif. Kehadiran gugus fungsi tambahan seperti  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ , dan  $-\text{NH}_2$  dapat meningkatkan laju pelarutan serta efisiensi penghambatan kerak (Demadis *et al.*, 2007).

### 2.7.2. Khelat

Khelat merupakan bahan kimia aditif yang mampu mengikat kation terlarut seperti  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dan  $\text{Ba}^{2+}$  dengan mencegahnya bereaksi dengan ion lawannya (Jones *et al.*, 2006). Mekanisme kerjanya adalah dengan mengubah muatan ion logam dari positif menjadi negatif, sekaligus mengikat logam tersebut ke dalam struktur cincin organik yang larut. Kompleks senyawa yang terbentuk antara khelat dan logam ini bersifat larut dalam air. Kompleks logam terlarut ini tidak lagi menunjukkan aktivitas kimia seperti ion non-kompleks, sehingga tidak menyebabkan pengendapan pada permukaan panas. Satu molekul khelat umumnya bereaksi dengan satu ion kalsium, meskipun dalam kondisi tertentu dapat mengikat beberapa ion, tergantung pada pH larutan. Namun, metode ini memerlukan dosis yang cukup besar untuk mencapai hasil yang diinginkan (Chauhan *et al.*, 2015). Komponen utama yang umum digunakan dalam pelarut

kerak adalah garam dari asam amino karboksilat (seperti EDTA, asam dietilentriaminpenta asetat, dan asam nitriltriasetat) serta senyawa polifosfonat (Knepper, 2003).

### **2.7.3. Distorsi Kristal**

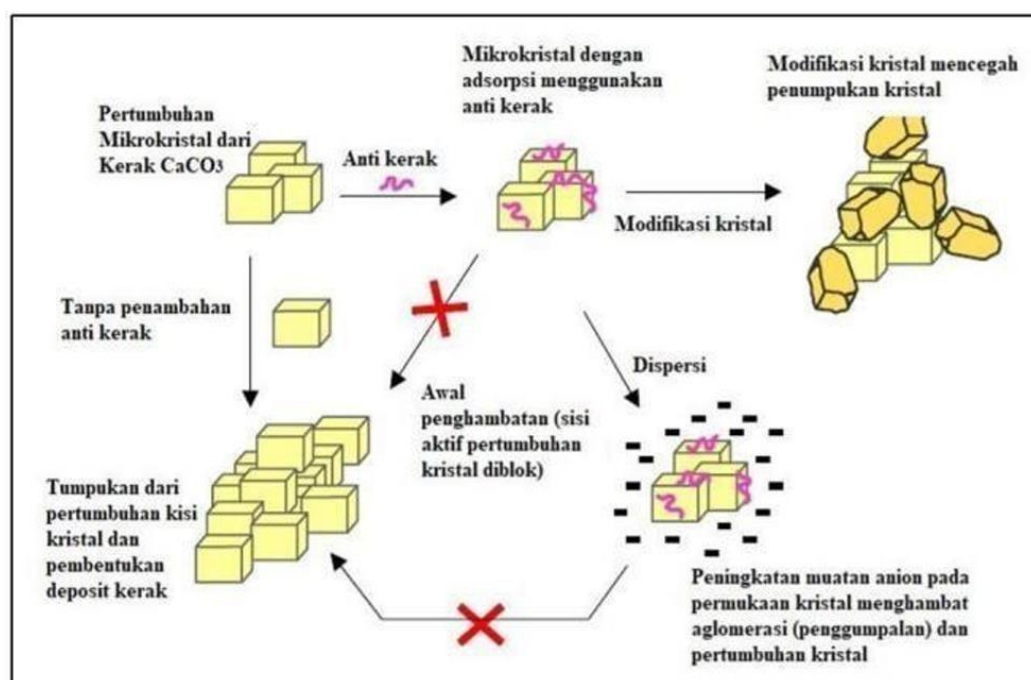
Molekul inhibitor menempel pada situs pertumbuhan kristal yang aktif, sehingga menghalangi dan mencegah perkembangan kristal lebih lanjut. Mekanisme penghambatan ini terjadi melalui proses distorsi kristal, di mana inhibitor kerak mengganggu penataan dan pertumbuhan kristal sehingga menghasilkan bentuk yang tidak beraturan dan non-kristalin (Suharso dan Buhani, 2015).

Distorsi yang terjadi pada kisi kristal menimbulkan tekanan internal yang membuat kristal menjadi rapuh dan halus. Kristal-kristal halus ini tidak mampu bertahan terhadap gaya mekanis dari aliran air, sehingga mudah terlepas dari permukaan pipa. Polimer dengan berat molekul rendah antara 2000-5000 menunjukkan kemampuan yang baik dalam menimbulkan distorsi kristal. Beberapa produk yang umum digunakan antara lain asam poliakrilat (PAA), asam polimaleat (PMA), poliamida, dendrimer poliamida, karboksimetil inulin, dan senyawa sejenis lainnya (Chauhan *et al.*, 2015).

### **2.7.4. Dispersi Kristal**

Dispersi merupakan campuran stabil dan seragam dari bahan-bahan yang tidak larut dalam suatu cairan. Pada proses pendispersian kristal, inhibitor teradsorpsi secara kimiawi ke permukaan kristal dan memberikan muatan tambahan. Muatan permukaan yang dihasilkan ini menimbulkan tolakan elektrostatis antarpartikel sejenis, sehingga mencegah terjadinya aglomerasi, mengurangi pertumbuhan partikel, dan akhirnya membentuk dispersi kristal. Adsorpsi inhibitor juga meningkatkan sifat hidrofilik kristal, yang membuatnya kurang mudah menempel

pada permukaan panas. Dengan demikian, dispersi mempengaruhi interaksi partikel ke partikel (homogen) maupun partikel ke permukaan (heterogen). Inhibitor jenis dispersi bekerja dengan memodifikasi permukaan kristal sehingga dapat mencegah pembentukan kerak pada permukaan panas (Chauhan *et al.*, 2015). Keempat mekanisme inhibitor yang telah dijelaskan - penghambatan, dispersi, modifikasi kristal, dan pengkelatan - pada dasarnya melibatkan proses adsorpsi anti-kerak untuk membatasi pembentukan kerak pada permukaan. Mekanisme keseluruhan proses ini dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Mekanisme Pencegahan Kerak dengan Penghambatan Ambang Batas, Dispersi, dan Modifikasi Kristal (Chauhan *et al.*, 2015).

## 2.8. Tanaman Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) berasal dari Nigeria, Afrika Barat. Meskipun demikian, ada yang menyatakan bahwa kelapa sawit berasal dari Amerika Selatan yaitu Brazil karena lebih banyak ditemukan spesies kelapa sawit di hutan Brazil dibandingkan Afrika. Pada kenyataannya, tanaman kelapa sawit

hidup subur di luar daerah asalnya, seperti Malaysia, Indonesia, Thailand, dan Papua Nugini. Tanaman kelapa sawit memiliki arti penting bagi pembangunan perkebunan nasional. Selain mampu menciptakan kesempatan kerja dan mengarah kepada kesejahteraan masyarakat, kelapa sawit juga sumber devisa negara dan Indonesia merupakan salah satu produsen utama minyak kelapa sawit (Fauzi dkk., 2002). Tanaman kelapa sawit berkembang biak dengan biji dan akan berkecambah untuk selanjutnya tumbuh menjadi tanaman. Susunan buah kelapa sawit dari lapisan luar sebagai berikut:

1. Kulit buah yang licin dan keras (*epicarp*).
2. Daging buah (*mesocarp*) terdiri atas susunan serabut (*fiber*) dan mengandung minyak.
3. Kulit biji (cangkang/tempurung) berwarna hitam dan keras (*endocarp*).
4. Daging biji (*mesoperm*) berwarna putih dan mengandung minyak.
5. Lembaga (*embrio*)

Limbah padat kelapa sawit dapat berupa tandan kosong, cangkang dan *fiber* (serabut). Diketahui untuk 1 ton kelapa sawit akan mampu menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit sebanyak 23% atau 230 kg, limbah cangkang (*shell*) sebanyak 6,5% atau 65 kg, *wet decanter solid* (lumpur sawit) 4% atau 40 kg, serabut (*fiber*) 13% atau 130 kg serta limbah cair sebanyak 50%. Serabut kelapa sawit mengandung nutrient, fosfor (P), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan karbon (C), sehingga limbah ini dapat menjadi sumber pertumbuhan bakteri, dimana bakteri dapat juga digunakan dalam proses pengolahan limbah. 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).

## 2.9 Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Asap cair terbentuk dari kondensasi asap melalui proses pirolisis konstituen kayu seperti lignin, hemiselulosa, dan selulosa. Asap cair mengandung berbagai senyawa fungsional (asam, alkohol, fenol) yang mempunyai peranan penting dalam pengendalian mikroorganisme dan menghambat pertumbuhan jamur serta bakteri. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi termal senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana pada kondisi tanpa udara atau adanya udara dalam jumlah yang terbatas. Produk cair dari proses pirolisis disebut sebagai asap cair (*liquid smoke*). Cara pirolisis dari bahan baku misalnya batok kelapa, serabut kelapa atau kayu pada suhu 400-600 °C selama 90 menit untuk memperoleh asap, lalu diikuti dengan proses kondensasi di dalam kondensor dengan menggunakan air sebagai pendingin. Pada dasarnya bahan baku untuk menghasilkan asap cair ini bermacam-macam, antara lain kayu, tandan kosong kelapa sawit, cangkang kelapa sawit, tempurung kelapa sawit, pelepah kelapa sawit, dan serabut kelapa sawit (Pratama dan Sa'diyah, 2022).

Asap cair dapat dimanfaatkan sebagai pengawet alami non pangan seperti pada industri kayu dan perkebunan karet. Asap cair mengandung berbagai senyawa yang terbentuk karena terjadinya pirolisis tiga komponen kayu yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komponen-komponen tersebut ditemukan dalam jumlah yang bervariasi tergantung pada jenis kayu, umur tanam dan tempat tumbuh kelapa sawit. Menurut Anom (2019), komponen utama asap cair dapat dikelompokkan menjadi tiga komponen utama yaitu:

### 1. Senyawa-Senyawa Fenol

Senyawa fenol diduga berperan sebagai antioksidan sehingga dapat memperpanjang masa simpan produk asapan. Kandungan senyawa fenol dalam asap sangat tergantung pada temperatur pirolisis kayu. Senyawa-senyawa fenol yang terdapat dalam asap kayu umumnya hidrokarbon aromatik yang tersusun dari cincin benzena dengan sejumlah gugus hidroksil yang terikat.

### 2. Senyawa-Senyawa Karbonil

Senyawa-senyawa karbonil dalam asap memiliki peranan pada pewarnaan dan

cita rasa produk asapan. Golongan senyawa ini mempunyai aroma seperti aroma karamel yang unik. Jenis senyawa karbonil yang terdapat dalam asap cair antara lain adalah vanilin dan siringaldehida.

### 3. Senyawa-Senyawa Asam

Senyawa-senyawa asam mempunyai peranan sebagai anti bakteri dan membentuk cita rasa produk asapan. Senyawa asam ini antara lain adalah asam asetat, propionat, butirrat, dan valerat.

Cangkang kelapa sawit merupakan salah satu limbah hasil sampingan perkebunan kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit mengandung sebagian besar senyawa yang terdiri atas golongan asam, fenol, karbonil, dan formaldehide, dimana fenol merupakan senyawa dengan peranan paling besar pengaruhnya sebagai bakteriostatik (Abidin dkk, 2021). Limbah cangkang kelapa sawit diperoleh dari adanya pemecahan inti kelapa sawit pada bagian pengolahan cangkang di pabrik kelapa sawit. Ditinjau dari karakteristisik bahan baku cangkang kelapa sawit memiliki banyak kemiripan dengan tempurung kelapa biasa (Ratnawati dan Hartanto, 2010). Komponen senyawa penyusun asap cair cangkang kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi senyawa-senyawa asap cair cangkang kelapa sawit.

<b>Golongan</b>	<b>Nama Senyawa</b>	<b>% Massa</b>
<b>Fenol</b>	Fenol	12,9%
	o-Kresol	0,64%
	Guaiakol	5,14%
	p-Metilguaiakol	0,49%
	p-Etilguaiakol	0,12%
<b>Karbonil</b>	Asetaldehida	0,22%
	2-Propanon (Aseton)	4,39%
	2,3-Butanedion	1,38%
	2-Butanon	6,75%
	Dimetil asetat	0,62%
<b>Asam</b>	Asam propionat	1,38%
<b>Alkohol</b>	Metanol	0,64%

(Ratnawati dan Hartanto, 2010).

## 2.10. Metode *Unseeded Experiment*

*Unseeded experiment* merupakan salah satu metode pembentukan kristal yang dilakukan tanpa penambahan bibit kristal (*seed crystal*) ke dalam larutan pertumbuhan. Dalam metode ini, proses nukleasi dan pertumbuhan kristal berlangsung secara spontan melalui mekanisme nukleasi homogen, yaitu ketika larutan telah mencapai kondisi lewat jenuh (supersaturasi) sehingga ion-ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  dalam larutan mulai bergabung membentuk inti kristal secara alami tanpa bantuan permukaan bibit kristal dari luar (Cashmore *et al.*, 2023). Proses nukleasi pada metode *unseeded* ini terjadi melalui beberapa tahapan, dimulai dari pembentukan spesies primer berukuran nanometer yang kemudian berasosiasi membentuk agregat lebih besar hingga akhirnya mengkristal sempurna menjadi  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Stawski *et al.*, 2020). Metode *unseeded* ini umumnya digunakan dalam studi pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) untuk mengamati laju pertumbuhan kerak secara alami tanpa pengaruh bibit kristal, sehingga data yang diperoleh mencerminkan kondisi aktual pembentukan kerak pada permukaan peralatan industri (Alhseinat *et al.*, 2021). Pemahaman terhadap laju pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  melalui metode ini sangat penting dalam upaya pencegahan kerak (*scale inhibition*) pada peralatan industri yang masih baru beroperasi, karena kerak yang terbentuk sejak dini dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas secara signifikan serta meningkatkan risiko penyumbatan (*fouling*) pada sistem perpipaan industri (Shaikh *et al.*, 2023).

## 2.11. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ )

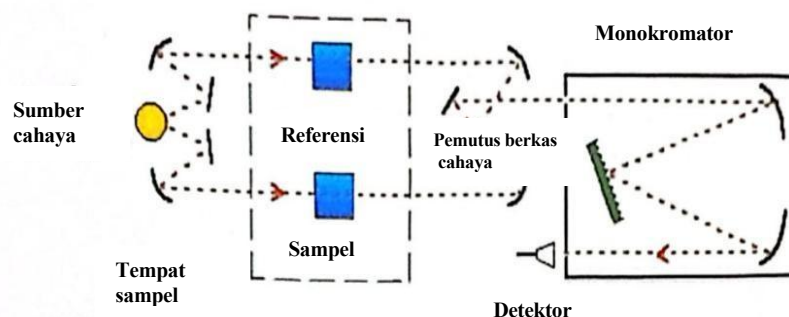
Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa analisis dan karakterisasi terhadap kerak  $\text{CaSO}_4$  yang telah terbentuk. Analisisnya meliputi unalisis menggunakan spektrofotometer IR untuk mengetahui adanya gugus-gugus fungsional utama dalam suatu sampel. Analisis menggunakan Gas *Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) digunakan untuk mengetahui komponen senyawa kimia pada inhibitor campuran. Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)

untuk mengetahui struktur kristal dari  $\text{CaSO}_4$ . Analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada permukaan kristal  $\text{CaSO}_4$ . Analisis distribusi ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui seberapa efektif inhibitor asap cair serabut kelapa sawit pada pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$ .

### 2.11.1. Spektrofotometer *Infra Red* (IR)

Spektrofotometer IR adalah spektrofotometer yang menggunakan sinar IR dekat, yakni sinar yang berada pada jangkauan panjang gelombang 2,5-25  $\mu\text{m}$  atau jangkauan frekuensi 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ . Sinar ini muncul akibat vibrasi atom-atom pada posisi kesetimbangan dalam molekul dan kombinasi vibrasi dengan rotasi menghasilkan spektrum vibrasi-rotasi (Khopkar, 2001). Spektrum IR suatu molekul adalah hasil transisi antara tingkat energi vibrasi dan osilasi. Bila molekul menyerap radiasi 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 (Supratman, 2010).

Adapun skema kerja dari spektrofotometer IR ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Skema kerja spektrofotometer *Infra Red* (Supratma, 2010)

Spektrum inframerah suatu molekul muncul akibat adanya perpindahan antara tingkat energi getaran yang berbeda. Atom-atom yang saling terikat melalui ikatan kovalen dapat bergetar atau berosilasi, menyerupai dua bola yang dihubungkan oleh sebuah pegas. Saat molekul menyerap radiasi inframerah, energi yang masuk meningkatkan amplitudo getaran antar atom, sehingga molekul berada pada keadaan vibrasi tereksitasi. Energi yang telah diserap tersebut kemudian dilepaskan kembali dalam bentuk panas ketika molekul kembali ke keadaan dasarnya. Panjang gelombang serapan inframerah suatu ikatan bergantung pada jenis getaran yang terjadi pada ikatan tersebut. Oleh sebab itu, berbagai jenis ikatan seperti C–H, C–C, C=O, C=C, dan O–H akan menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang yang berbeda-beda. Dengan demikian, spektroskopi inframerah dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi dalam suatu molekul (Kombongkila dkk., 2024) . Perkiraan nilai daerah serapan FTIR untuk beberapa gugus fungsi 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

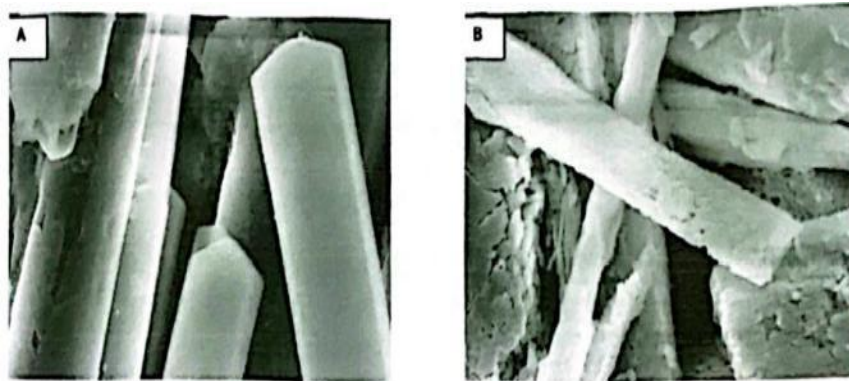
(Kombongkila dkk., 2024).

### 2.11.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah suatu alat yang digunakan untuk mengetahui morfologi atau struktur mikro permukaan dari suatu bahan atau material. Instrumen mikroskop elektron biasa digunakan untuk melihat ukuran dan bentuk partikel terutama untuk bubuk yang relatif kasar. Metode SEM merupakan pemeriksaan dan analisa permukaan atau lapisan yang tebalnya 20 µm

dari permukaan. Hasilnya berupa topografi dengan segala tonjolan dan bentuk permukaan. Gambar topografi diperoleh dari penangkapan pengolahan elektron sekunder yang dipancarkan dari spesimen.

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) (Rahmawati dan Nuraliyah, 2024). Pada penelitian Suharso dkk. (2015) melalui pengamatan morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor senyawa kaliksarena 50 ppm dapat terlihat pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa penambahan inhibitor membuat bentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  menjadi lebih kecil, rapuh, dan tidak beraturan dibandingkan dengan kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa inhibitor.

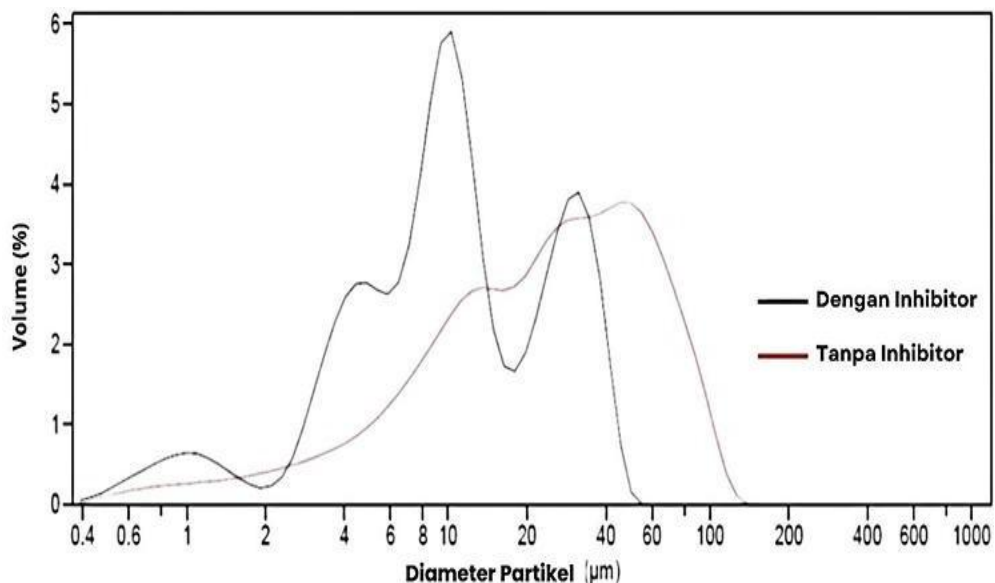


**Gambar 8.** Gambar SEM morfologi kristal  $\text{CaSO}_4$  dengan 5000x pembesaran (a) tanpa inhibitor, (b) dengan inhibitor 50 ppm (Suharso *et al.*, 2014)

### 2.11.3. Particle Size Analyzer (PSA)

*Particle size analyzer* (PSA) merupakan alat yang digunakan untuk karakterisasi distribusi ukuran partikel pada sampel. PSA dapat diaplikasikan pada material

padat, emulsi, suspensi dan aerosol. Pada analisis suatu sampel banyak variasi metode yang dapat dilakukan, beberapa metode dapat digunakan untuk menganalisis partikel dalam jangkauan yang luas dan beberapa metode lagi digunakan untuk penerapan yang lebih spesifik. PSA lebih spesifik untuk menentukan ukuran partikel yang berbentuk lingkaran. Penggunaan dari difraksi laser cukup umum dalam metode pengukuran partikel, terutama ukuran partikel  $0,5 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$ . Prinsip kerja dari PSA yaitu saat cahaya (laser) dihamburkan oleh kumpulan partikel, sudut cahaya hamburan akan berbanding terbalik dengan ukuran partikel. Semakin besar sudut cahaya hamburan maka ukuran partikel akan semakin kecil (Horiba, 2014). Hasil dari analisis menggunakan PSA dalam penelitian ini untuk mengetahui distribusi ukuran partikel dari kerak  $\text{CaSO}_4$  seperti pada Gambar 9. Pada Gambar 9 menunjukkan distribusi partikel kerak  $\text{CaSO}_4$  mengalami perubahan terhadap penggunaan inhibitor.



**Gambar 9.** Distribusi ukuran partikel  $\text{CaSO}_4$  (Suharso *et al.*, 2021)

Penyinaran sinar laser pada analisis ukuran partikel dalam keadaan tersebar. Pengukuran distribusi intensitas difraksi cahaya spasial dan penyebaran cahaya dari partikel. Distribusi ukuran partikel dihitung dari hasil pengukuran. Difraksi sinar laser analisis ukuran partikel meliputi perangkat laser untuk menghasilkan sinar laser ultraviolet sebagai sumber cahaya dan melekatkan atau melepaskan (Jatmiko, 2019).

#### **2.11.4. Gas Chromatography-Mas Spectrometry (GC-MS)**

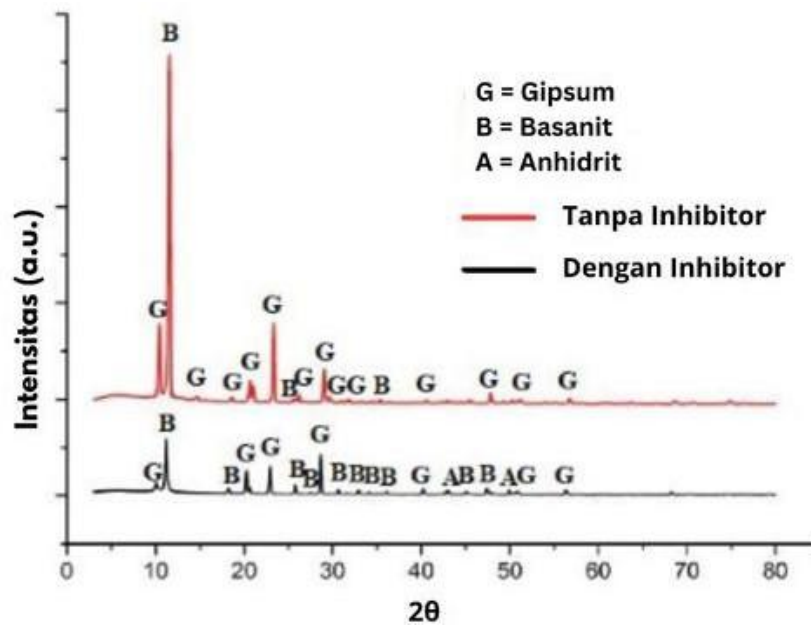
*Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) merupakan metode pemisahan suatu senyawa berdasarkan volatilitas unsur-unsur pembentuk senyawa yang dirangkaikan dengan detektor yang mengidentifikasi jenis komponen berdasarkan massanya. Metode ini digunakan untuk menganalisa berbagai macam komponen penyusun suatu senyawa yang berbentuk gas dan stabil dalam suhu yang cukup tinggi yang kemudian diidentifikasi berdasarkan massa molekulnya (Rahmawati dkk., 2023). Prinsip kerja GC-MS adalah sampel yang berupa cairan diinjeksikan ke dalam injektor kemudian diuapkan. Sampel yang berupa uap dibawa oleh gas pembawa menuju kolom untuk proses pemisahan. Setelah terpisah, masing-masing komponen akan melalui ruang pengion dan dibombardir oleh elektron sehingga terjadi ionisasi. Fragmen-fragmen ion yang dihasilkan akan ditangkap oleh detektor dan dihasilkan spektrum massa (Pavia *et al.*, 2006).

#### **2.11.5. 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 dkk., 2023).

Analisis difraksi sinar-X didasarkan pada susunan sistematis atom-atom atau ion-ion di dalam bidang kristal yang dapat tersusun sedemikian rupa sehingga membentuk kisi kristal dengan jarak antar bidang ( $d$ ) yang khas. Setiap spesies

mineral mempunyai susunan atom yang berbeda-beda sehingga membentuk bidang kristal yang dapat memantulkan sinar-X dalam pola difraksi yang karakteristik. Pola difraksi inilah yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi suatu senyawa. Pola difraksi yang terbentuk dari analisis menggunakan XRD pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui fase kristalin yang terbentuk pada kerak  $\text{CaSO}_4$ . Pada Gambar 10 dapat diketahui contoh pola difraksi XRD pada kerak  $\text{CaSO}_4$ , yang terdiri dari fase gipsum, basanit, dan anhidrit.



**Gambar 10.** Pola XRD kristal  $\text{CaSO}_4$  (Suharso *et al.*, 2019)

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kimia Anorganik Fisik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, dari Oktober 2025 hingga Februari 2026. Analisis dengan menggunakan instrumen Spektrofotometer FT-IR dilaksanakan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu Universitas Lampung. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu Universitas Lampung. Analisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia. Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dan *X-Ray Diffraction* (X-RD) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang.

#### 3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu alat-alat gelas, *waterbath* (Thermoscientific AC 200/S21), *turbine digital flow meter fuel*, reaktor pirolisis, gelas plastik, *magnetic stirrer*, oven (merek Innotech), pH meter, neraca analitik labu ukur, gelas ukur, corong, pipet tetes, neraca analitik (Airshwoth AA-160), pH meter (Methrom 827), spektrofotometer IR (merek Cary 630 Agilent) diproduksi di Amerika Serikat, *Gas Chromatography-MassSpectrometry* (GC-MS) merek Shimadzu QP 2010 SE diproduksi di Jepang, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merek ZEISS EVO MA 10 diproduksi di Jerman, *X-Ray Diffraction*

(XRD) merek PANalitycal 29 MPD PW3040/60 diproduksi di Belanda, dan *Particle Size Analyzer* (PSA) merek Cilas 1090D diproduksi di Perancis

Bahan-bahan yang digunakan terdiri dari  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , akuades, kertas saring, kupon logam, dan asap cair dari cangkang kelapa sawit.

### **3.3. Prosedur Penelitian**

#### **3.3.1. Pembuatan Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit**

Asap cair yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari cangkang kelapa sawit melalui proses pirolisis. Pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit dilaksanakan di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Cangkang kelapa sawit terlebih dahulu dicuci dan dikeringkan di bawah sinar matahari langsung. Cangkang kelapa sawit yang sudah kering dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, kemudian cangkang kelapa sawit dipirolisis dengan variasi suhu 300 °C, 400 °C, dan 500 °C sampai 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. Kemudian dilakukan analisis menggunakan spektrofotometer IR untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam asap cair cangkang kelapa sawit dan analisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen senyawa kimianya.

#### **3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit**

Pembuatan inhibitor diawali dengan membuat larutan stok asap cair cangkang kelapa sawit konsentrasi 100, 125, dan 150 ppm. Larutan stok asap cair 2000 ppm

dibuat dengan melarutkan 2 gram asap cair cangkang kelapa sawit dalam labu ukur hingga volume 1000 mL akuades, lalu dihomogenkan sehingga diperoleh larutan stok konsentrasi 2000 ppm. Pembuatan larutan inhibitor asap cair dengan konsentrasi 100 ppm dilakukan dengan mengambil 25 mL larutan stok kemudian ditambah 500 mL akuades di dalam labu ukur hingga tanda batas, lalu dihomogenkan sehingga diperoleh larutan inhibitor dengan konsentrasi 100 ppm. Kemudian diukur nilai keasamannya menggunakan pH meter. Perlakuan yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 125 dan 150 ppm. Untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat di dalam asap cair cangkang kelapa sawit dilakukan analisis spektrofotometer FTIR dan untuk mengetahui adanya komponen senyawa kimia yang terdapat dalam asap cair cangkang kelapa sawit dilakukan analisis menggunakan GC-MS.

### **3.3.3. Pengujian Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dalam Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat ( $\text{CaSO}_4$ )**

Pengujian asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor dilakukan untuk mengetahui kemampuannya dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Proses pengujian ini menggunakan metode *unseeded experiment* yang memungkinkan pengamatan terbentuknya kristal tanpa penambahan inti awal. Tahapan pelaksanaannya meliputi beberapa langkah percobaan, diantaranya sebagai berikut:

#### **3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Kerak $\text{CaSO}_4$ Tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode *Unseeded Experiment***

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,02 M dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,02 M masing-masing dalam 100 mL akuades. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan

pengaduk magnet (*spinbar*) selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,02 M dan larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,02 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet (*spinbar*) selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Setelah kedua larutan dicampurkan, Larutan  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk kemudian dimasukkan dalam *waterbath* pada suhu 80 °C selama 4 jam untuk mencapai kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang berat awal, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3 jam. Percobaan ini diulangi dengan variasi konsentrasi larutan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 0,02; 0,03; 0,04; dan 0,05 M untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  tanpa penambahan inhibitor sebesar 0,01; 0,015; 0,02; dan 0,025 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 kerak menggunakan XRD, dan distribusi partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

### **3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 300, 400, dan 500 °C dengan Menggunakan Kertas Saring**

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,02 M dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,02 M masing-masing dalam 100 mL inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 100 ppm. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan kedalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet (*spinbar*) selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,02 M dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,02 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet (*spinbar*) selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak  $\text{CaSO}_4$  dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter. Larutan  $\text{CaSO}_4$  yang terbentuk dimasukkan ke dalam *waterbath* pada suhu 80 °C selama 4 jam untuk mencapai

kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang berat awalnya, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3 jam. Percobaan ini diulangi dengan variasi konsentrasi larutan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar 0,02; 0,03; 0,04; dan 0,05 M serta pada variasi inhibitor 125 dan 150 ppm menggunakan asap cair cangkang kelapa sawit, dan diulangi juga pada variasi suhu pemanasan pada proses pirolisis 300 °C, 400 °C, dan 500 °C. Endapan yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kerak menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

### **3.3.3.3. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak $\text{CaSO}_4$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis suhu 300, 400, dan 500 °C pada Sistem dengan Laju Alir menggunakan Kupon Logam**

Larutan pertumbuhan disiapkan dengan melarutkan  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,02 M dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,02 M masing-masing dalam 500 mL larutan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit berkonsentrasi 100 ppm. Setiap larutan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 15 menit pada suhu 80 °C hingga homogen, kemudian kedua larutan dicampurkan dan diaduk kembali selama 15 menit pada suhu yang sama untuk memicu pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$ .

Larutan yang mengandung endapan  $\text{CaSO}_4$  dipertahankan pada suhu 80 °C selama 4 jam sambil dialirkan melalui alat *turbine digital flow meter fuel* yang telah dipasang kupon logam yang sebelumnya dibersihkan, dikeringkan dalam oven suhu 105 °C, dan ditimbang untuk mengetahui berat awal. Setelah pengujian, kupon logam dikeringkan dalam oven dengan suhu 105 °C dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat akhir dari kupon logam tersebut. Kemudian selisih berat digunakan untuk menentukan massa endapan dan menghitung efektivitas inhibitor. Hal ini diulangi juga pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,05 M serta pada variasi inhibitor 150 ppm menggunakan asap cair cangkang kelapa sawit

untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$ .

### 3.3.4. Analisis Data

Analisis data dilakukan berdasarkan berat endapan kerak kalsium sulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) terhadap variasi suhu pirolisis, baik tanpa maupun dengan inhibitor, pada berbagai variasi konsentrasi larutan dan konsentrasi inhibitor. Data kemudian diolah dan diplot menggunakan Microsoft Excel, di mana nilai *slope* dari masing-masing grafik menunjukkan tingkat pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$ . Morfologi kerak  $\text{CaSO}_4$  sebelum dan setelah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), perubahan ukuran partikel dianalisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA), dan struktur kerak dianalisis menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD). Efektivitas asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor pertumbuhan kerak  $\text{CaSO}_4$  ditentukan menggunakan Persamaan 3 (Suharso *et al.*, 2019). Sementara rendemen asap cair dihitung menggunakan dua pendekatan: *wet basis*, yaitu volume asap cair dibagi massa umpan basah dikali 100% (Persamaan 4); dan *dry basis*, yaitu volume asap cair dibagi massa umpan kering dikali 100% (Persamaan 5) (Jayanudin *et al.*, 2021).

$$\text{Efektivitas Inhibitor (\%)} = \frac{W_k - W_i}{W_k} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan :

$W_k$  : berat kerak tanpa inhibitor

$W_i$  : berat kerak dengan inhibitor

$$WB = \frac{\text{Volume asap cair (mL)}}{\text{Massa umpan basah (g)}} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

$$DB = \frac{\text{Volume asap cair (mL)}}{\text{Massa umpan kering (g)}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

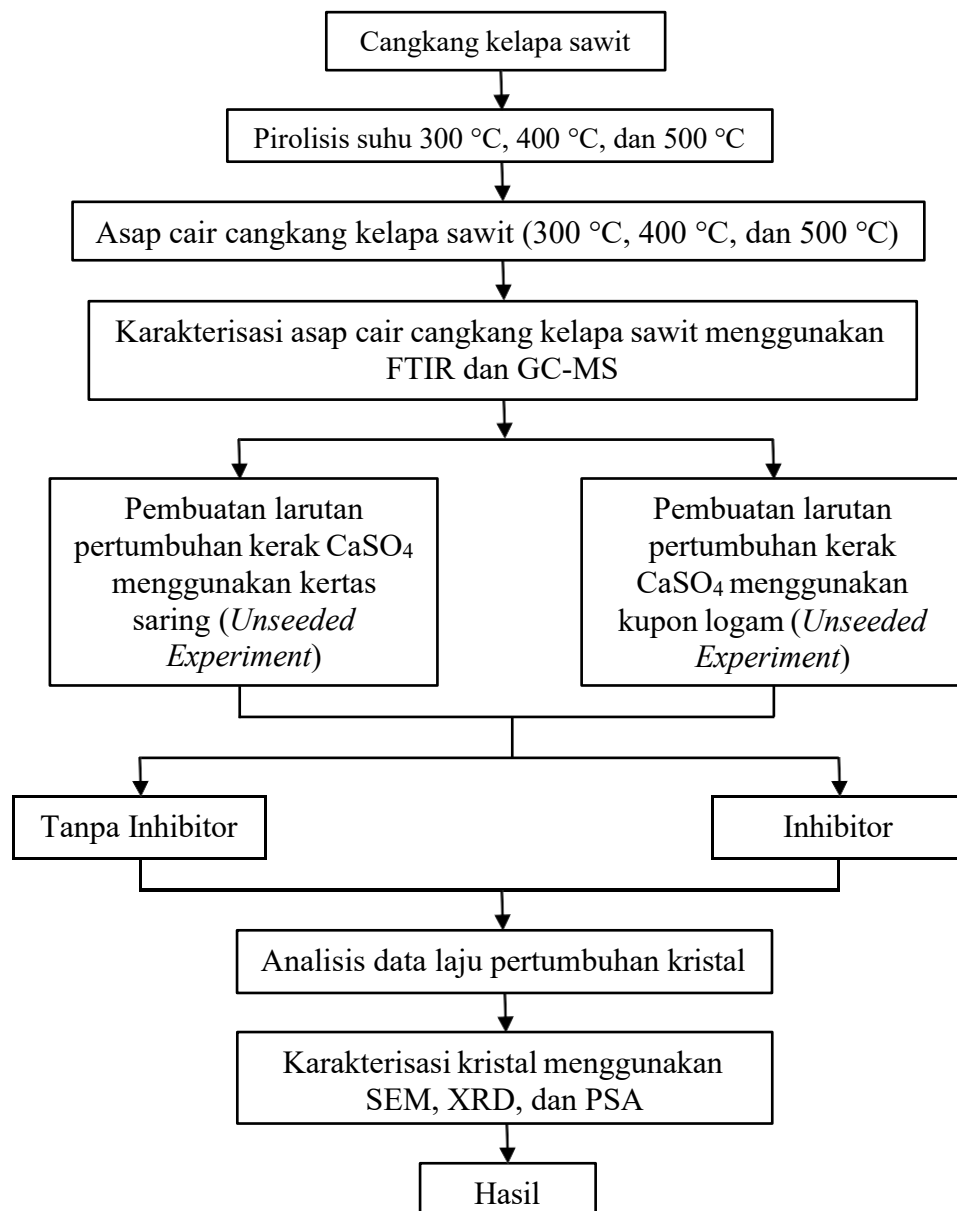
Dimana:

Massa umpan kering (g) = Massa umpan basah (g)  $\times$  (1 – kadar air)..... (6)

Kadar air = (massa basah – massa kering)  $\div$  massa basah  $\times$  100 %

### 3.3.5. Diagram Alir

Adapun rangkaian pada penelitian ini dapat diilustrasikan melalui diagram penelitian yang terlihat dalam Gambar 11.



**Gambar 11.** 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 cangkang kelapa sawit hasil pirolisis pada suhu 300 °C, 400 °C, dan 500 °C terbukti dapat digunakan sebagai inhibitor pembentukan kerak CaSO<sub>4</sub>, dengan urutan efektivitas penghambatan dari tertinggi ke terendah adalah 400 °C > 500 °C > 300 °C.
2. Efektivitas penghambatan tertinggi diperoleh pada konsentrasi CaSO<sub>4</sub> 0,02 M dengan inhibitor asap cair pirolisis 400 °C pada konsentrasi 150 ppm, yaitu sebesar 91,54% (metode kertas saring) dan 97,80% (metode kupon logam).
3. Analisis morfologi permukaan kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) menggunakan SEM menunjukkan terjadinya perubahan morfologi permukaan kerak. Tanpa penambahan inhibitor, kerak terlihat berbentuk batang, besar, rapat, dan lebar. Sedangkan dengan penambahan inhibitor kerak menjadi berukuran kecil, pendek, dan tidak beraturan.
4. Analisis fase kristal kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) menggunakan XRD menunjukkan adanya perbedaan fase pada saat tanpa penambahan inhibitor yang didominasi dengan fase gipsum dan basanit, dan dengan penambahan inhibitor didominasi oleh fase gipsum.
5. Analisis kerak kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa sebelum dan setelah penambahan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 150 ppm mengalami penurunan ukuran partikel kerak, yakni nilai *mean* (rata-rata) menurun dari 7470,2 nm menjadi 6699,8 nm dan nilai tengah (*median*) menurun dari 7031,8 nm menjadi 6730,2 nm.

## 5.2. Saran

Untuk meningkatkan mutu penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan saran agar dilakukan kajian lebih lanjut mengenai efektivitas inhibitor dalam menghambat pembentukan kerak  $\text{CaSO}_4$  dengan menggunakan asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis pada suhu  $400\text{ }^\circ\text{C}$  yang dibedakan berdasarkan grade (grade 1, grade 2, dan grade 3), sehingga dapat diketahui pengaruh perbedaan komposisi kimia terhadap kemampuan penghambatannya. Selain itu, metode pengujian efektivitas inhibitor sebaiknya menggunakan kupon logam sebagai pengganti kertas saring, karena metode ini lebih mencerminkan kondisi nyata pada sistem perpipaan, sehingga hasil yang diperoleh menjadi lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. R. Hudaya., dan W. K. Dewi. 2021. Asap Cair Dari Proses Pirolisis Berbahan Cangkang Sawit Sebagai Bahan Aktif Antibakteri Untuk Hand Sanitizer. *Agriculture Universitas Bogor*. 1-10.
- Aditya, V. 2019. Pengaruh Penambahan Aditif 5 ppm Ion Cu terhadap Pertumbuhan Kerak Mg pada Pipa Laminer dengan Laju 30 mL/Menit *Jurnal TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*. 19 (2): 76-86.
- Afrah, B. D., Riady, M. I., Payomthip, P., Ramadhanty, R. V., Rizki, F., and Alfayyadh, M. L. 2024. Analysis of Liquid Smoke Grade Characteristics from Coconut Shells and Palm Kernel Shell Waste Through a Slow Pyrolysis Process. *ITB Journal of Engineering and Technological Sciences*. 56 (4): 545–558.
- Alhseinat, E., Abi Jaoude, M., Alkatheeri, A., Darawsheh, I., and Safieh, A. 2021. Insights Into the Composite Scale Formation and Coprecipitation Behavior of  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{SrSO}_4$  at Different Salinity Level. *Surfaces and Interfaces*. 22 (4): 100-115.
- Anom, I. D. 2019. Pembuatan Asap Cair Sabut Kelapa sebagai Bahan Pengawet Kayu pada Kelompok Tani Kelapa Di Desa Kamangta Kecamatan Pineleng. *Abdimas: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*. 12 (3): 31-36.
- Ansari, F. A. and Pandit, A. B. 2019. Inhibition of Calcium Sulfate Scale Formation: Effect on Crystal Growth and Morphology. *Crystal Growth and Design*. 19 (3): 1464-1474.
- Apaydin, V. E. and Mutlu, U. 2023. TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. *Energies MDPI*. 1 (16): 2-19.
- Cashmore, A., Miller, R., Jolliffe, H., Brown, C. J., Lee, M., Haw, M. D., and Sefcik, J. 2023. Rapid Assessment of Crystal Nucleation and Growth Kinetics: Comparison of Seeded and Unseeded Experiments. *Crystal Growth & Design*. 23 (8): 5680–5692.

- Cao, Z., Hu, Y., Zhao, H., Cao, B., and Zhang, P. 2022. Sulfate Mineral Scaling: From Fundamental Mechanisms to Control Strategies. *Water Research*. 222 (55): 118-145.
- Chraka, A., Majdoubi, H., Hsissou, R., Safi, Z., Elaattiaoui, A., Louhi-Harchaoui, I., Hajjaji, S. E., and Bouchta, D. 2024. Innovative Application of Green Surfactants as Eco-friendly Scale Inhibitors in Industrial Water Systems. *Scientific Reports*. 14 (5): 27-81.
- Chauhan, S., Patel, R., and Singh, R. 2015. Synthesis of Modified Polyaspartic Acid and Evaluation of its Scale Inhibition and Dispersion Apacity. *Desalination*. 35 (8): 10-18.
- Dai, C., Zhang, Y., Li, X., Wang, J., and Liu, H. 2022. Crystallization Behavior and Morphology of Calcium Sulfate in the Absence and Presence of Inhibitors. *Crystal Growth and Design*. 22 (5): 3120-3129.
- Dera, N. S. 2018. Pengaruh pH Larutan Terhadap Nukleasi Dan Pertumbuhan Kristal Barium Sulfat Didalam Pipa Beraliran Laminar: Pengamatan Kristal Menggunakan SEM-EDX Dan XRD. *Journal of Infrastructure and Science Engineering*. 1 (2): 1-8.
- Ekananda, R., Wismawati, E., dan Budiyanto, E. N. 2019. Pengaruh Campuran Asam Sitrat Dan Asam Sulfamat Sebagai Alternatif Pembersihan Kerak pada Pipa Material Carbon Steel. *Proceeding 4rd Conference of Piping*.
- Faisal, M., Gani, A., Mulana, F., Desvita, H., and Kamaruzzaman, S. 2020. Effects of Pyrolysis Temperature on the Composition of Liquid Smoke Derived from Oil Palm Empty Fruit Bunches. *Rasayan Journal of Chemistry*. 13 (1): 514-520.
- Fauzi, Y., Widyastuti, Y. E., Sastyawibawa, I., dan Hartono, R. 2002. *Budidaya Pemanfaatan dan Analisa Usaha dan Pemasaran Kelapa Sawit*. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Gailani, A., Hamadani, A., and Kadhum, R. 2024. Natural-based Scale Inhibitors for  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{CaCO}_3$ : Mechanisms and Applications in Water Treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 58 (34): 104-112.
- Gailani, A., Taylor, M. J., Zaheer, M. H., and Barker, R. 2024. Evaluation of Natural Organic Additives as Eco-friendly Inhibitors for Calcium and Magnesium Scale Formation in Water Systems. *ACS Environmental Au*. 4 (6): 354–365.
- Guthrie, J. D., Rowell, C. E. R., Anyaeche, R. O., Alzarieni, K. Z., and Kenttämaa, H. I. 2024. Characterization of the Degradation Products of Lignocellulosic Biomass by Using Tandem Mass Spectrometry Experiments, Model Compounds, and Quantum Chemical Calculations. *Journal of the*

- American Society for Mass Spectrometry*. 33 (1): 123–134.
- Han, Z., Yang, X., Li, J., Liu, X., Zhou, Y., and Gao, M. 2022. Experimental Study of Salicylic Acid as a Calcium Sulfate Dihydrate Scale Inhibitor, Analyzed from Surface Properties and Crystal Growth. *ACS Omega*. 7 (39): 34752–34762.
- Hasibuan, R. and Pradede, H. M. 2023. Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Characteristics of Coconut Shell Charcoal. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 12 (1): 46-53.
- Hasson, D. and Semiat, R. 2005. Calcium Sulfate Scale Formation and Inhibition in Desalination Systems. *Desalination*. 1 (3): 73-84.
- He, X., Lu, X., and Gu, X. 2022. A Review on Lignin Pyrolysis: Pyrolytic Behavior, Mechanism, and Relevant Upgrading for Improving Process Efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 15 (1): 80-106.
- Horiba. 2014. *A Guidebook to Particle Size Analysis*. Horiba Instruments. Inc. USA.
- Housse, M., Tabti, H., El Azzouzi, M., Bammou, L., Salhi, A., and Bazzi, L. 2024. Green and Sustainable Strategies to Control Scaling in Industrial Plants: Investigation of the Efficacy of *Rosmarinus officinalis* L: Extract Against CaCO<sub>3</sub> Scale Using Experimental and Theoretical Approaches. *Environmental Technology*. 46 (3): 351–365.
- 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.
- Jatmiko, W. A. 2019. *Pengaruh Rasio Jumlah dan Diameter Bola Baja Dalam Proses sintesis Material dengan Shaker Milling Terhadap Ukuran Partikel Kaolin*. Skripsi. Program Sarjana Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Jayanudin, J., Suhendi, A., and Uyun, J. 2021. Perancangan dan Aplikasi Alat Pirolisis untuk Pembuatan Asap Cair. *Jurnal Teknologi Agro-Industri, Sultan Ageng Tirtayasa University*. 2 (1): 3-7.
- Kelland, M. A. 2014. *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry* (2nd ed.). CRC Press. London.
- Khopkar, S. M. 2001. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta.

- 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.
- Liu, Y., Chen, T., Wang, J., Sun, W., and Zhang, H. 2020. Adsorption and Inhibition Behavior of Organic Compounds on Calcium Sulfate Scale Formation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 5 (6): 272-281
- Liu, Y. and Zhang, P. 2022. Review of Phosphorus-Based Polymers for Mineral Scale and Corrosion Control in Oilfield. *Polymers*. 14 (1): 26-73.
- Loc, N.X. and Phuong, D.T.M. 2025. Optimizing Biochar Production: a Review of Recent Progress in Lignocellulosic Biomass Pyrolysis. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 12 (1): 148–172.
- Lubis, R. E., Purba, A. R., dan Caliman, J. P. 2022. Praktik Manajemen Terbaik Kelapa Sawit. *Pusat Penelitian Kelapa Sawit*.
- Lu, X. and Gu, X. 2022. A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 1(15): 3-43.
- Maulina, S., Mulyati, S., dan Siregar, H. P. 2018. Karakteristik Asap Cair dari Proses Pirolisis Biomassa dan Pengaruh Suhu Terhadap Kandungan Fenol Serta pH. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 7 (2): 1-6.
- 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.
- Muryanto, S., Bayuseno, A. P., and Sediono, W. 2014. Scale Inhibition of Calcium Sulfate Using Natural Inhibitors. *Procedia Chemistry*. 9(2): 69–76.
- Mustain, I., Abdurrohman., dan H. Rahmanto. 2019. Studi Kinerja Fresh Water Generator Di Kapal AHTS PETEKA 5401. *Jurnal Sains Teknologi Transportasi Maritim*. 1 (2): 7-12.
- Nuhardin, N., Albar, A., and Anugrah, R. 2023. Pengaruh Suhu Pirolisis Terhadap Karakteristik Asap Cair dari Biomassa. *Jurnal Teknologi Kimia*. 12 (1): 45-52.
- Pavia, D. L, Lampman, G. M., Kriz, G. S., and Engel, R. G. 2006. *Introduction to Organic Laboratory Techniques: A Microscale Approach 4th ed*. Brooks Cole Laboratory Series for Organic Chemistry. USA.

- Pratama, A. S. C. dan Sa'diyah, K. 2022. Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Asap Cair Melalui Metode Pirolisis. *Jurnal Teknologi Separast.* 8 (1): 36-44.
- 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.
- Rahmawati, K. P., Aini, D. M., dan Harniati, W. 2023. Ekstrak Jeruk Nipis Sebagai Obat Terapi Penyembuhan Penyakit Gastritis dengan metode GC-MS. *Journal of Pharmaceutical and Health Research.* 4 (1): 152-158.
- 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.
- Ratnawati, R. dan Hartanto, S. 2010. Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Sawit dengan Metode Aktivasi Kimia. *Jurnal Sains Materi Indonesia.* 12 (1):12-16.
- Salimuddin, S., Ginting, Z. G., Bahri, S. B., Muhammad, M., dan Jalaluddin, J. 2023. Optimasi Variabel Massa, Suhu dan Waktu Pirolisis pada Pembuatan Asap Cair (Liquid Smoke) dari Limbah Padat Nilam menggunakan Metode RSM. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS).* 3 (3): 338–349.
- 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.
- Santoso, P., 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): 1-10.
- 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 Scienceteae.* 14 (3) : 272–284.
- Shaikh, K., Kazi, S. N., Zubir, M. N. M., Wong, K. H., Khan, W. A., Abdullah, S., and Sugumaran, L. 2023. A review of Recent Advancements in the Crystallization Fouling of Heat Exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 148 (22): 12369–12392.

- Speight, J. G. 2016. *Handbook of Hydraulic Fracturing*. Wiley. Germany.
- Stamatakis, E., Chatzichristos, C., Sagen, J., Stubos, A. K., Palyvos, I., Muller, J., and Stokkan, J.A. 2006. An Integrated Radiotracer Approach for the Laboratory Evaluation of Scale Inhibitors Performance in Geological Environments. *Chemical Engineering Science*. 61 (16): 5057–5069.
- Stawski, T. M., Raiteri, P., Velore, J., Matamoros, V. A., Rademacher, D., Blukis, R., and Benning, L. G. 2020. Initial Stages of Gypsum Nucleation: The Role of Nano/microdust". *Minerals*. 10 (12): 1083-1094.
- Sudarmaji, A. T., dan Hadi, S. 2021. Pengaruh Penambahan Larutan Ca(OH)<sub>2</sub> Terhadap Pembentukan Kerak pada Penguapan Nira Tebu. *Jurnal Teknologi Separasi*. 7 (2) : 634–641.
- Suharso. dan Buhani. 2015. *Penanggulangan Kerak Edisi 2*. Graha Ilmu. Bandar Lampung.
- Suharso, S. dan Buhani, B. 2015. Pengaruh Berbagai Parameter Terhadap Laju Pertumbuhan Kristal dan Pembentukan Kerak. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 4 (2): 85-92.
- Suharso, S. and Buhani, B. 2012. Inhibition of Calcium Carbonate Scale Formation Using Natural Organic Compounds. *Indonesian Journal of Chemistry*. 12 (2): 123-130.
- Suharso, S., Buhani, B., and Sumadi, S. 2019. Inhibition of Calcium Sulfate Scale Formation Using Natural Organic Compounds: Adsorption Mechanism and Crystal Growth Modification. *Indonesian Journal of Chemistry*. 19 (3): 789-797.
- Suharso, Buhani, and Aprilia, L. 2014. Influence of Calix Arene Derived Compound on Calcium Sulphate Scale Formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26 (18): 6155-6158.
- Suharso, Buhani, Bahri, S., and Endaryanto, T. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as a Green Inhibitor of Calcium Sulfate (CaSO<sub>4</sub>) Scale Formation. *Asian Journal Research Chemistry*. 3 (1): 183-187.
- 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, Buhani, dan Tugiono. 2015. *Pembuatan Senyawa Turunan Kaliksarena Untuk Inhibitor Kerak Material Anorganik*. Prosiding SEMIRATA 2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Suharso, Setiosari, E., Kiswandono, A. A., Buhani, and Satria, H. 2019. Liquid

Smoke of Coconut Shell as Green Inhibitor of Calcium Carbonate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169 (2) : 29-37.

- Supratman, U. 2010. *Ekiulibrium Penentuan Senyawa Organik*. Universitas Padjajaran. Bandung.
- Surboyo, M. D. C., Baroutian, S., Puspitasari, W., Zubaidah, U., Cecilia, P. H., Mansur, D., Iskandar, B., Ayuningtyas, N. F., Mahdani, F. Y., and Ernawati, D. S. 2024. Health benefits of liquid smoke from various biomass sources: A systematic review. *BIO Integration*. 5 (1): 1–19.
- Susilowati, S., Aqil, U., Giritama Wibowo, H., dan Karaman, N. 2024. Pengaruh Pengadukan dan Konsentrasi ZnCl<sub>2</sub> pada Pembentukan Kristal Barium Sulfat dengan Metode Batch Kristalisasi. *Inovasi Teknik Kimia*. 9 (2) : 92–97.
- Svehla, G. 1990. *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*. PT Kalman Media Pustaka. Jakarta.
- Verma, C., Ebenso, E. E., Quraishi, M. A., and Hussain, C. M. 2021. Recent Developments in Sustainable Corrosion Inhibitors: Design, Performance and Industrial Scale Applications. *Materials Advances*. 2 (12): 3806–3837.
- Wang, H., Li, T., Su, J., Miao, K., and Wang, K. 2022. Noncatalytic Hydropyrolysis of Lignin in a high Pressure Micro-Pyrolyzer. *Fuel Processing Technology*. 9 (10): 233-289.
- Wang, J., Liu, Y., Zhang, H., Chen, X., and Li, Q. 2021. Effect of pH on the Adsorption and Inhibition Performance of Organic Inhibitors on Calcium Sulfate Scale Formation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 5 (8): 151-160.
- Wang, R., Wan, G., Yan, Y., Sabeghi, M., Ming, Z., Allen, J.K., and Mistree, F. 2019. Ontology-Based Representation of Meta-Design in Designing Decision Workflows. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 19 (1): 1-19.
- Xin, X., Dell, K., Udugama, I.A., Young, B.R. and Baroutian, S. 2021. Transforming Biomass Pyrolysis Technologies to Produce Liquid Smoke Food Flavouring. *Journal of Cleaner Production*. 4 (29): 4-30.
- Xin, X., Zhang, X., Liu, Q., Chen, L., and Wang, Y. 2022. Effect of Pyrolysis Temperature on the Formation of Tar and Distribution of Products from Biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 (3): 162-178.
- Ye, Y., Zhang, Y., Fan, J., and Chang, J. 2022. A review on Lignin Pyrolysis: Pyrolytic Behavior, Mechanism, and Relevant Upgrading for Improving Process Efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 15 (106): 2-43.

- Zhang, X., Wang, Y., Liu, H., Chen, Z., and Li, J. 2022. Inhibition Mechanism of Calcium Sulfate Scale Formation by Organic Inhibitors: Role of Adsorption and Dispersion Effects. *Journal of Colloid and Interface Science*. 6 (14): 546-556.
- Zhang, Y., Xu, F., Chen, F., Zhang, Y., Wu, Y., and Jiang, L. 2022. Dual Utilization of Lignocellulose Biomass and Glycerol Waste to Produce Fermentable Levoglucosan via Fast Pyrolysis. *Frontiers in chemistry*. 1 (10): 1-7.
- Zhao, Y., Liu, Y., and Wang, J. 2024. Inhibition of Crystal Nucleation and Growth: A review. *Crystal Growth & Design*. 24 (6): 2645–2665.