

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM KARBONAT (CaCO_3) MENGGUNAKAN METODE
*UNSEEDED EXPERIMENT***

(Skripsi)

Oleh

**KHANSA FATHRIZKIYA JULISA
NPM 2217011015**



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

ABSTRAK

STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM KARBONAT (CaCO_3) MENGGUNAKAN METODE *UNSEEDED EXPERIMENT*

Oleh

KHANSA FATHRIZKIYA JULISA

Kerak kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan permasalahan yang sering dijumpai pada sistem perpipaan industri karena dapat menurunkan efisiensi operasional secara signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh suhu pirolisis terhadap komposisi senyawa kimia, kestabilan, dan efektivitas asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor kerak CaCO_3 .

Penelitian ini menggunakan metode *unseeded experiment* dengan variasi suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C. Konsentrasi inhibitor yang digunakan yaitu 5, 10, 15, dan 20 ppm, sedangkan konsentrasi larutan pertumbuhan CaCO_3 divariasikan pada 0,0005 M; 0,0010 M; 0,0020 M; dan 0,0030 M.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pirolisis berpengaruh nyata terhadap kestabilan dan efektivitas inhibitor. Asap cair hasil pirolisis pada suhu 400 °C menunjukkan kestabilan tertinggi karena tidak mengalami pertumbuhan jamur selama periode pengamatan, sementara asap cair pada suhu 300 °C dan 500 °C mengalami kerusakan masing-masing pada hari ke-27 dan ke-10. Nilai efektivitas tertinggi diperoleh pada asap cair suhu pirolisis 400 °C dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm pada larutan pertumbuhan 0,0005 M, yaitu sebesar 95,03%. Efektivitas inhibitor berbanding lurus dengan konsentrasi inhibitor dan berbanding terbalik dengan konsentrasi larutan pertumbuhan. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan adanya perubahan morfologi dan struktur kristal CaCO_3 setelah penambahan inhibitor, di mana kristal yang terbentuk lebih tersebar, berukuran lebih kecil, dan tidak seragam. Analisis *Particle Size Analyzer* (PSA) memperlihatkan penurunan ukuran partikel rata-rata kerak CaCO_3 dari 7.470 nm menjadi 4.413 nm, disertai penurunan nilai *polydispersity index* dari 0,496 menjadi 0,1428 setelah penambahan inhibitor.

Kata kunci: asap cair tempurung kelapa, pirolisis, inhibitor, kalsium karbonat, *unseeded experiment*

ABSTRACT

STUDY OF THE EFFECT OF HEATING TEMPERATURE IN THE PYROLYSIS PROCESS OF LIQUID SMOKE FROM COCONUT SHELL AS AN INHIBITOR OF CALCIUM CARBONATE (CaCO_3) SCALE USING THE *UNSEEDED EXPERIMENT* METHOD

By

KHANSA FATHRIZKIYA JULISA

Calcium carbonate (CaCO_3) scale is a common problem encountered in industrial piping systems as it can significantly reduce operational efficiency. This study aimed to investigate the effect of pyrolysis temperature on the chemical composition, stability, and effectiveness of coconut shell liquid smoke as a CaCO_3 scale inhibitor. This study employed the *unseeded experiment* method with pyrolysis temperature variations of 300, 400, and 500 °C. The inhibitor concentrations used were 5, 10, 15, and 20 ppm, while the CaCO_3 growth solution concentrations were varied at 0.0005 M, 0.0010 M, 0.0020 M, and 0.0030 M. The results showed that pyrolysis temperature significantly affected the stability and effectiveness of the inhibitor. Liquid smoke produced at a pyrolysis temperature of 400 °C exhibited the highest stability, as no fungal growth was observed throughout the observation period, whereas liquid smoke at 300 °C and 500 °C deteriorated on day 27 and day 10, respectively. The highest inhibition efficiency was achieved by liquid smoke pyrolyzed at 400 °C with an inhibitor concentration of 20 ppm in a 0.0005 M growth solution, reaching 95.03%. Inhibitor effectiveness was directly proportional to inhibitor concentration and inversely proportional to the growth solution concentration. Analysis using *Scanning Electron Microscopy* (SEM) and *X-Ray Diffraction* (XRD) revealed changes in the morphology and crystal structure of CaCO_3 upon inhibitor addition, where the resulting crystals were more dispersed, smaller in size, and less uniform. *Particle Size Analyzer* (PSA) analysis showed a reduction in the average CaCO_3 particle size from 7.470 nm to 4.413 nm, accompanied by a decrease in the *polydispersity index* from 0.496 to 0.1428 following inhibitor addition.

Keywords: coconut shell liquid smoke, pyrolysis, inhibitor, calcium carbonate, *unseeded experiment*

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM KARBONAT (CaCO_3) MENGGUNAKAN METODE
*UNSEEDED EXPERIMENT***

Oleh

**KHANSA FATHRIZKIYA JULISA
2217011015**

Skripsi

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

Pada

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



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

Judul Skripsi :

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN
PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR DARI
TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI
INHIBITOR KERAK KALSIMUM KARBONAT
(CaCO₃) MENGGUNAKAN METODE
UNSEEDED EXPERIMENT**

Nama Mahasiswa :

Khansa Fathrizkiya Julisa

Nomor Pokok Mahasiswa :

2217011015

Program Studi :

Kimia

Fakultas :

Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Sekretaris : Prof. Dr. Buhani, M.Si.

Anggota : Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 24 Juni 2026

**SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Khansa Fathrizkiya Julisa
Nomor Pokok Mahasiswa : 2217011015
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 Tempurung Kelapa Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”** adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, metode, 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 sesuai dengan kesepakatan dan sepanjang nama saya disebutkan.

Bandar Lampung, Juni 2026

Yang menyatakan



Khansa Fathrizkiya Julisa
NPM 2217011015

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Khansa Fathrizkiya Julisa dilahirkan di Gisting pada tanggal 11 Juli 2004 yang merupakan anak kedua dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Jazuli dan Ibu Safriati. Penulis menyelesaikan Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Dharma Wanita Kota Agung pada tahun 2010 dan melanjutkan ke Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 3

Kuripan pada tahun 2016, kemudian melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama (SMP) di MTS Negeri 1 Tanggamus pada tahun 2019, selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di MAN 1 Bandar Lampung pada tahun 2022.

Penulis diterima di Jurusan S1 Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa kimia, penulis aktif berorganisasi menjadi anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) periode 2023 sebagai anggota Biro Penerbitan (BP). Sebagai bentuk aplikasi ilmu pengetahuan dan penerapan Tri Dharma Perguruan Tinggi, penulis telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Srengsem, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung pada Juli- Agustus 2025. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan sosial seperti Karya Wisata Ilmiah (KWI) BEM-FMIPA Unila. Selain itu, penulis juga telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) dengan judul “Pengaruh Berat Batubara Pada Proses *Air Dry Loss* (ADL) Terhadap Laju Pengeringan Batubara Pada Parameter *Gross Calorific Value* (GCV) di PLN Nusantara Power UP Sebalang, Kecamatan Katibung, Kabupaten Lampung Selatan. Pada bulan Oktober-Februari 2026 penulis menyelesaikan

penelitian yang dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik FMIPA Universitas Lampung yang diberi Judul “Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Pada Proses Pirolisis Asap Cair Dari Tempurung Kelapa Sebagai Inhibitor Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”.

MOTTO HIDUP

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya
Dia mendapat (pahala) dari (kebajikan) yang dikerjakannya dan mendapat
(siksa) dari (kejahatan) yang diperbuatnya”
(Q.S Al-Baqarah: 286)

“Allah tidak mengatakan hidup ini mudah. Tetapi Allah berjanji bahwa
sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”
(Q.S Al-Insyirah: 5-6)

“Bukan kesulitan yang membuat kita takut, tapi ketakutan yang membuat kita
sulit”
(Ali bin Abi Thalib)

“It’s fine to fake it until you make it, until you do, until it’s true”
(Taylor Swift)

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan alhamdulillahirobbil'alamin puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, shalawat semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang senantiasa diharapkan syafaatnya. Kupersembahkan karya sederhana ini sebagai wujud cinta, bakti, dan tanggung jawabku kepada:

Kedua Orang Tuaku Tersayang

Terima kasih atas segala doa yang tak henti dipanjatkan, cinta yang tak pernah habis dibagikan, serta pengorbanan dan ketulusan yang diberikan. Terima kasih telah menjadi sandaran, penyemangat, dan tempat pulang yang paling tulus sepanjang perjalanan penulis menyelesaikan skripsi ini.

Rasa hormat saya kepada:

Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D.

Prof. Dr. Buhani, M.Si.

Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc

Terima kasih atas bimbingan, ilmu, nasihat, dan kesabaran dalam membimbing penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.

Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia

Atas dedikasi dan ilmu yang bermanfaat yang telah diberikan kepada saya selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung.

Sahabat, teman-teman kimia angkatan 2022, dan semua pihak yang terlibat selama proses pendidikan yang telah mendukung, memberikan semangat, bantuan, dan kebersamaan dalam suka maupun duka.

Serta

Almamater Tercinta
Universitas Lampung

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, karunia, serta ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Proses Pirolisis Asap Cair Tempurung Kelapa Sebagai Inhibitor Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”** disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, para sahabat, serta seluruh umat beliau. Semoga kita termasuk golongan yang mendapatkan syafa’atnya di hari akhir. Aamiin yaa rabbal ‘aalamiin.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai tantangan dan kesulitan, baik dalam penyusunan isi maupun pemilihan kata. Namun, berkat doa, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak, skripsi ini akhirnya dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan teriring doa penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Ir. Suharso, S.Si, Ph.D. selaku dosen pembimbing I, yang telah memberikan masukan, bimbingan, arahan, ilmu, nasihat, saran, kebaikan, kemudahan, dan kesabaran kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Prof. Dr. Buhani, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II atas kebaikan, ketekunan, ketelitian, bimbingan, arahan, masukkan dan ilmu pengetahuan yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

3. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembahas, atas motivasi, saran, serta masukan yang membangun yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
4. Prof. Andi Setiawan selaku Pembimbing Akademik, penulis mengucapkan terimakasih atas ketersediaan Bapak dalam memberikan bimbingan selama perkuliahan.
5. Bapak Dr. Eng. Heri satria, S.Si, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si., sebagai Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan pendidikan di kampus.
8. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat FMIPA, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi hingga dapat terselesaikan.
9. Teristimewa kedua orang tuaku tersayang, Ayah Jazuli dan Mama Safriati. Terima kasih yang tak terhingga kepada ayah dan mama karena dengan penuh rasa sayang dan cinta kasih selalu memberikan doa, dukungan, kesabaran yang luas tiada batas, semangat, nasihat, motivasi, dan materi selama penulis menempuh pendidikan. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi, memberkahi, memberikan rezeki, kesehatan, dan umur yang panjang agar bisa selalu mendampingi dan menyaksikan keberhasilan lainnya yang akan penulis raih di masa yang akan datang, *Aamiin yaa rabbal 'aalamiin*.
10. Kepada saudara kandung penulis, Kyai Farhan, Adik Lutfi dan Adik Tisha. Terima kasih atas segala kasih sayang, dukungan, dan kebahagiaan yang telah diberikan. Meskipun kebersamaan kita tak selalu dipenuhi dengan ketenangan, terkadang penuh canda tawa, perdebatan kecil, namun semua itu justru menjadi warna bagi kita sebagai saudara. Semoga Allah SWT senantiasa menjaga, melindungi, memberikan kesehatan, kebahagiaan serta umur yang

panjang agar kita bisa menyaksikan satu sama lain meraih kesuksesan di masa yang akan datang, *Aamiin yaa rabbal'aalamiin*.

11. Teman-teman terdekat penulis, Mawar Nisrina Putri, Tegar Putra Arrasyid dan Carera Patricia Febriani terima kasih atas segala bantuan, dukungan, semangat, canda tawa serta kebersamaan yang telah diberikan selama masa perkuliahan, mulai dari awal menjadi mahasiswa baru hingga terselesaikannya skripsi ini. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan kemudahan, keberkahan, serta kesuksesan dalam setiap Langkah dan urusan kita.
12. Teman-teman seperjuangan penelitian Suharso Research, Tegar, Agung, Yenaly, Kadek, Widia dan Bunga, terima kasih atas kebersamaan, kerja sama, dukungan, semangat, serta segala bantuan yang telah diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga segala ilmu, pengalaman, dan perjuangan yang telah dilalui bersama menjadi bekal untuk meraih kesuksesan di masa yang akan datang.
13. Teman-teman KKN Srengsem yang telah menjadi bagian dari perjalanan yang singkat, tetapi begitu berkesan. Terima kasih atas kebersamaan, kenangan, serta pengalaman berharga yang telah dilalui bersama selama pelaksanaan KKN. Semoga kita semua diberikan kemudahan serta kesuksesan dalam setiap langkah kehidupan.
14. Seluruh keluarga besar Kimia Angkatan 2022 dan teman-teman kelas C yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas kebersamaan dan pengalaman yang telah diberikan selama menjalani masa perkuliahan, mulai dari awal mahasiswa baru hingga terselesaikannya skripsi ini. Semoga kita semua dapat meraih cita-cita serta kesuksesan di masa depan.
15. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala bantuan, dukungan, dan doa yang dipanjatkan. Semoga kebaikan yang telah diberikan selama ini mendapat balasan dari Allah SWT.
16. *Last but not least*, terima kasih untuk Khansa Fathrizkiya Julisa yaitu diri penulis sendiri atas segala perjuangan yang mungkin tidak banyak orang tahu, atas segala mimpi dan karir yang diam-diam kamu perjuangkan, usahakan dan doakan untuk menjemput takdir itu. Tugas Akhir ini bukanlah akhir dari segala perjalanan panjang yang sudah dirakit sebaik mungkin, namun sebuah

awal memulai kehidupan baru untuk mendekatkan diri kepada mimpi yang pernah kamu gengam. Kamu sudah melakukan yang terbaik, teruslah melanjutkan perjalanan yang lebih baik lagi di masa yang akan datang. *I'm so proud of you*, Khansa Fathrizkiya Julisa.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan tidak terlepas dari berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan dan penyempurnaan karya ilmiah ini di masa yang akan datang. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan terbaik dari Allah SWT.

Bandar Lampung, 24 Juni 2026

Khansa Fathrizkiya Julisa

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	6
1.3. Manfaat.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Kerak	7
2.2. Pengendapan Senyawa Anorganik	8
2.3. Pembentukan Kerak dan Endapan.....	9
2.3.1. Faktor Pembentukan Kerak.....	11
2.4. Kristal	13
2.5. Faktor Pembentukan Kristal	14
2.5.1. Kristalisasi	14
2.5.2. Kelarutan Endapan	15
2.5.3. Derajat Lewat Jenuh.....	16
2.6. Kalsium Karbonat (CaCO ₃).....	17
2.6.1. Pengaruh Terbentuknya Kerak CaCO ₃	18
2.6.2. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak CaCO ₃	19
2.7. Mekanisme Kerja Inhibitor.....	21
2.8. Asap Cair Tempurung Kelapa	24
2.9. Metode <i>Unseeded Experiment</i>	26
2.10. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Karbonat (CaCO ₃)	26
2.10.1. <i>Fourier Transform-infrared</i> (FTIR)	27
2.10.2. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	28
2.10.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	29
2.10.4. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	30
2.10.5. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA).....	31

III. METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	33
3.2. Alat dan Bahan	33
3.3. Prosedur Penelitian	34
3.3.1. Pembuatan Asap Cair	34
3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa	34
3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaCO ₃	35
3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Kerak CaCO ₃ Tanpa Penambahan Inhibitor dengan metode <i>Unseeded</i> <i>Experiment</i>	35
3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor Kerak CaCO ₃ dengan metode <i>Unseeded Experiment</i>	36
3.3.3.3. Prosedur Pengujian Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak CaCO ₃ pada Sistem dengan Laju Alir	37
3.4. Analisis Data.....	37
3.5. Diagram Alir Penelitian.....	38
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1. Pengaruh Suhu Pirolisis terhadap Produksi Asap Cair Tempurung Kelapa dan Konsumsi Gas.....	40
4.1.1. Pirolisis pada Suhu 300 °C	42
4.1.2. Pirolisis pada Suhu 400 °C	42
4.1.3. Pirolisis pada Suhu 500 °C	43
4.1.4. Perbandingan Konsumsi Gas dan Produktivitas antar Suhu	44
4.2. Uji Ketahanan Inhibitor	45
4.3. Analisis Gugus Fungsi Asap Cair Tempurung Kelapa Menggunakan <i>Fourier Transform-infrared (FTIR)</i>	47
4.4. Analisis Inhibitor Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass</i> <i>Spectrometer (GC-MS)</i>	49
4.4.1. Analisis Komponen Senyawa Kimia Pada Asap Cair Tempurung Kelapa pada Suhu 300 °C	50
4.4.2. Analisis Komponen Senyawa Kimia Pada Asap Cair Tempurung Kelapa pada Suhu 400 °C	53
4.4.3. Analisis Komponen Senyawa Kimia Pada Asap Cair Tempurung Kelapa pada Suhu 500 °C	56
4.5. Karakteristik pH Asap Cair Tempurung Kelapa	61
4.6. Penentuan Pertumbuhan Kerak CaCO ₃ Tanpa Penambahan Inhibitor dengan metode <i>Unseeded Experiment</i>	63
4.7. Penentuan Efektivitas Inhibitor Kerak CaCO ₃ dengan metode <i>Unseeded</i> <i>Experimen</i>	64
4.7.1. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu Pirolisis 300 °C.....	65
4.7.2. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu Pirolisis 400 °C.....	67
4.7.3. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu Pirolisis 500 °C.....	69

4.8. Pengaruh pH Larutan CaCO_3 terhadap Efektivitas Inhibitor	71
4.9. Analisis Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa terhadap Pembentukan Kerak CaCO_3 pada Kupon Logam.....	74
4.9.1. Kupon Logam pada Konsentrasi Larutan 0,0005 M	74
4.9.2. Kupon Logam pada Konsentrasi Larutan 0,0030 M	76
4.10. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa pada Berbagai Suhu Pirolisis	78
4.11. Analisis Kalsium Karbonat (CaCO_3).....	82
4.12. Analisis Permukaan Kerak CaCO_3 Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	84
4.13. Analisis Distribusi Ukuran Partikel CaCO_3 Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	87
4.14. Analisis Struktur Kerak CaCO_3 Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	90
4.15. Model Penghambatan Kerak oleh Inhibitor.....	93
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	95
5.1. Simpulan.....	95
5.2. Saran	96
DAFTAR PUSTAKA.....	97
LAMPIRAN.....	104

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kandungan asap cair tempurung kelapa serta titik didihnya.....	26
2. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 300 °C.....	42
3. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 400 °C.....	43
4. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 500 °C.....	43
5. Perbandingan konsumsi gas dan produktivitas pirolisis tempurung kelapa ..	44
6. Gugus fungsi pada spektrum IR asap cair	49
7. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 300 °C	51
8. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 400 °C	54
9. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 500 °C	57
10. Perbandingan komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada variasi suhu 300, 400, dan 500°C.	58
11. Nilai pH asap cair tempurung kelapa pada berbagai suhu pirolisis.....	61
12. Perbandingan pH larutan CaCO ₃ tanpa inhibitor dan dengan inhibitor 20 ppm dari ketiga suhu pirolisis.....	72
13. Perbandingan hasil penelitian dengan literatur.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Endapan kerak kalsium karbonat dalam pipa.....	8
2. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air	13
3. Tahapan kristalisasi.....	15
4. Diagram temperatur-konsentrasi	17
5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal (○ = inhibitor, ◇ = bibit kristal)	24
6. Morfologi kristal CaCO ₃ (a) tanpa inhibitor (b) dengan adanya inhibitor 300 ppm pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 dan 0,6 M (Pembesaran x2500)....	30
7. Pola XRD kerak CaCO ₃ (a) tanpa aditif asam tartrat, (b) aditif 4 ppm, (c) aditif 6 ppm dan (d) aditif 10 ppm	31
8. Distribusi ukuran partikel kristal CaCO ₃ tanpa inhibitor dan dengan adanya inhibitor 300 ppm pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 M.....	32
9. Diagram alir penelitian.....	39
10. (a) Reaktor pirolisis kapasitas 10 kg yang digunakan pada suhu 300 °C dan 400 °C (b) Reaktor pirolisis kapasitas 20 kg yang digunakan pada suhu 500 °C	41
11. Larutan asap cair tempurung kelapa setelah didiamkan selama 3 bulan (a) 300 °C (b) 400 °C (c) 500 °C.....	46
12. Spektrum FTIR asap cair tempurung kelapa dengan variasi suhu (a)300 °C (b) 400 °C (c) 500 °C.....	47
13. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 300 °C..	50
14. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 400 °C..	53

15. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 500 °C..	56
16. Grafik perbandingan laju pertumbuhan kristal CaCO_3 dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan tanpa penambahan inhibitor.....	64
17. Diagram batang pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak CaCO_3 pada suhu pirolisis 300 °C	66
18. Diagram batang pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak CaCO_3 pada suhu pirolisis 400 °C	68
19. Diagram batang pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak CaCO_3 pada suhu pirolisis 500 °C	70
20. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan 0,0005 M (a) sebelum pengujian (b) setelah pengujian tanpa inhibitor (c) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (d) dengan inhibitor hasil pirolisis 400 °C (e) dengan inhibitor hasil pirolisis 500 °C dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm.....	75
21. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan 0,0030 M (a) sebelum pengujian (b) setelah pengujian tanpa inhibitor (c) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (d) dengan inhibitor hasil pirolisis 400 °C (e) dengan inhibitor hasil pirolisis 500 °C dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm.....	77
22. Larutan pertumbuhan CaCO_3 0,0005 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor 20 ppm.	82
23. Larutan pertumbuhan CaCO_3 0,0030 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor 20 ppm	83
24. Endapan larutan pertumbuhan CaCO_3 0,0030 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor 20 ppm	84
25. Morfologi kerak CaCO_3 pada konsentrasi 0,0030 M perbesaran 3000; 5000; 10.000; dan 20.000 tanpa penambahan asap cair tempurung kelapa.	85
26. Morfologi kerak CaCO_3 pada konsentrasi 0,0030 M perbesaran 3000x; 5000x; 10.000x; dan 20.000x dengan penambahan asap cair tempurung kelapa.	85
27. Difraktogram kerak CaCO_3 (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor asap cair tempurung kelapa.....	90
28. Grafik Perbandingan distribusi partikel kerak CaCO_3 0,0030 M tanpa inhibitor dan dengan inhibitor asap cair tempurung kelapa.....	88
29. Model penghambatan kerak oleh inhibitor.	94

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagian besar sektor industri di Indonesia, baik di bidang kimia, gas, maupun perminyakan, sangat bergantung pada penggunaan air dalam sistem kerjanya. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada peralatan industri selama beroperasi adalah pengendapan (*scaling*). Kerak mengendap dan tumbuh pada peralatan, seperti pada pipa industri. Pipa industri yang berfungsi sebagai saluran fluida berpotensi mengalami permasalahan yang serius karena seiring berjalannya waktu, dapat terjadi penumpukan kerak. Pengendapan kerak di dalam pipa mengakibatkan penurunan efisiensi dan diameter pipa, sehingga 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 (Musmuliadi, 2020). Salah satu dampak signifikan dari masalah ini terjadi di industri perminyakan, di mana PT Pertamina Tbk menghabiskan dana sekitar 6–7 juta dolar setiap 10 tahun untuk mengganti pipa-pipa di instalasi geotermal akibat kerusakan yang disebabkan oleh kerak (Suharso *et al.*, 2017).

Kerak merupakan tumpukan keras dari bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air. 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 serta cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuk kerak (Raharjo, 2020). Adapun komponen-komponen kerak yang sering dijumpai pada peralatan industri berupa kalsium sulfat (CaSO_4), kalsium karbonat (CaCO_3), turunan dari kalsium bikarbonat, kalsium dan seng fosfat, kalsium fosfat, sejumlah besar kalsium, dan ortofosfat. Kerak kalsium

karbonat (CaCO_3) merupakan kerak yang paling umum terjadi pada dinding-dinding pipa industri yang melibatkan aliran fluida. Kelarutan CaCO_3 yang sedikit dapat terbentuk jika dalam larutan lewat jenuh terjadi kesetimbangan kimia pada tekanan dan temperatur yang sama. Kesetimbangan CaCO_3 dapat diganggu dengan adanya pengurangan gas CO_2 dari aliran selama proses produksi berlangsung. Hal ini akan mengakibatkan pengendapan sehingga terbentuk kerak CaCO_3 (Raharjo, 2020).

Pembentukan kerak yang terjadi secara alami diakibatkan oleh adanya reaksi kimia antara kandungan-kandungan zat yang tidak dikehendaki yang terdapat dalam air, yaitu seperti alkalin, kalsium, klorida, sulfat, nitrat, besi, seng, tembaga, fosfat, dan aluminium. Adanya pembentukan kerak ini menimbulkan banyak kerugian, antara lain menyebabkan gangguan transfer panas, korosi pada pipa aliran fluida, dan lain-lain. Akibatnya biaya dan kerugian yang ditimbulkan sangat tinggi karena sebagian besar biaya perawatan alat ditujukan untuk mengganti atau memperbaiki komponen yang rusak. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa metode pengendalian telah dikembangkan. Salah satunya adalah penggunaan air bebas mineral, namun metode ini memerlukan biaya tinggi dan kurang efisien untuk skala industri besar. Alternatif lainnya adalah pengaturan pH dengan penambahan asam, tetapi metode ini meningkatkan risiko korosi serta bahaya dalam penanganannya. Solusi yang dianggap efektif dengan biaya ringan yaitu dengan penambahan bahan kimia penghambat kerak atau *scale inhibitors* (Suharso dan Buhani, 2015). Inhibitor kerak merupakan senyawa kimia yang ditambahkan ke dalam suatu sistem air dalam konsentrasi kecil sehingga dapat menghambat atau mencegah terbentuknya kerak. Penambahan inhibitor pada kerak digunakan untuk menurunkan kadar pH larutan, mengontrol komposisi morfologi dan fasa kristal pada kerak (Suharso dan Buhani, 2015).

Penggunaan inhibitor cukup menarik karena pada kadar di bawah 100 ppm sudah mampu menahan pembentukan kerak dalam jangka waktu yang relatif lama. Kehadiran aditif sebagai inhibitor yang efektif menyebabkan peningkatan konduktivitas serta menghasilkan kristal berukuran lebih kecil dibandingkan kondisi tanpa aditif. Efektivitas inhibitor ini sangat dipengaruhi oleh

konsentrasinya, di mana semakin tinggi konsentrasi yang diberikan, semakin besar pula kemampuan inhibitor tersebut dalam memperlambat proses pembentukan kerak (Xinyu Guo *et al.*, 2021).

Inhibitor kerak bekerja dengan mengganggu proses nukleasi dan pertumbuhan kristal, sehingga mencegah pembentukan endapan. Inhibitor sintetis seperti fosfonat, polimer akrilat, dan senyawa organofosfat sering digunakan karena efektivitasnya yang tinggi. Namun demikian, senyawa-senyawa tersebut bersifat toksik, tidak mudah terurai, dan berpotensi mencemari lingkungan. Sebagai solusi alternatif inhibitor kerak dapat diperoleh secara alami dari tanaman yang ramah lingkungan. Beberapa penelitian telah dilakukan dalam penambahan inhibitor untuk mencegah pertumbuhan kerak CaCO_3 . Contohnya menggunakan asap cair tempurung kelapa (Suharso *et al.*, 2019), ekstrak kemenyan (*Styrax Benzoid Dryand*) (Suharso *et al.*, 2017), ekstrak kulit manggis (*Garcinia mangostana L.*) (Suharso *et al.*, 2022), dan ekstrak daun gambir (*Uncaria gambir*) (Suharso *et al.*, 2019).

Asap cair merupakan hasil kondensasi uap dari proses pirolisis biomassa, yang mengandung berbagai senyawa kimia aktif seperti asam organik (asam asetat, asam format), fenol, aldehida, dan senyawa karbonil. Senyawa-senyawa tersebut memiliki kemampuan berinteraksi dengan ion pembentuk kerak, terutama ion Ca^{2+} , sehingga dapat menghambat proses nukleasi dan pertumbuhan kristal kalsium karbonat (CaCO_3) (Suharso dan Buhani, 2011). Dengan mekanisme tersebut, asap cair berpotensi dimanfaatkan sebagai inhibitor kerak anorganik pada sistem perpipaan atau peralatan industri yang menggunakan air sadah. Salah satu bahan baku yang sangat potensial untuk menghasilkan asap cair adalah tempurung kelapa, karena memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pemanfaatan limbah tempurung kelapa sebagai bahan baku pirolisis tidak hanya meningkatkan nilai tambah secara ekonomi, tetapi juga menjadi alternatif dalam pengelolaan limbah biomassa yang ramah lingkungan (Ton *et al.*, 2020).

Proses pirolisis tempurung kelapa melibatkan pemanasan tanpa oksigen, di mana suhu pirolisis yang digunakan sangat menentukan komposisi kimia asap cair yang dihasilkan. Pada suhu pirolisis 300 °C, proses dekomposisi komponen lignoselulosa belum berlangsung sempurna, sehingga asap cair yang terbentuk didominasi oleh senyawa asam organik sederhana seperti asam asetat, asam format, serta sejumlah kecil aldehida dan keton. Kandungan asam yang tinggi menjadikan asap cair bersifat lebih asam (pH rendah), sehingga mampu meningkatkan kelarutan ion Ca^{2+} dalam larutan dan menekan pembentukan endapan CaCO_3 . Namun, pada suhu ini juga masih terbentuk tar dan air dalam jumlah besar, yang dapat menurunkan kestabilan dan efektivitas asap cair sebagai inhibitor kerak. Ketika suhu pirolisis dinaikkan menjadi 400 °C, proses dekomposisi lignin dan selulosa berlangsung lebih optimal. Pada kondisi ini terbentuk senyawa fenolik seperti guaiakol, kresol, dan fenol, bersamaan dengan asam organik volatil dalam jumlah yang cukup (Sahrurn *et al.*, 2021).

Keseimbangan antara kandungan asam organik dan senyawa fenolik pada suhu ini menjadikan asap cair memiliki komposisi paling aktif secara kimia. Asam organik berfungsi menurunkan pH dan menghambat pengendapan CaCO_3 melalui peningkatan kelarutan ion kalsium, sedangkan fenol berperan sebagai chelating agent yang mampu membentuk kompleks dengan ion Ca^{2+} , sehingga menghambat nukleasi dan pertumbuhan kristal CaCO_3 di permukaan logam. Oleh karena itu, asap cair hasil pirolisis pada suhu 400 °C dinilai memiliki daya hambat kerak paling efektif dibandingkan suhu lainnya. Sementara itu, pada suhu pirolisis yang lebih tinggi yaitu 500 °C, senyawa organik kompleks mengalami dekomposisi lebih lanjut menjadi gas ringan seperti CO , CO_2 , dan CH_4 . Kondisi ini mengakibatkan penurunan kandungan fenol dan asam organik, karena sebagian besar senyawa aktif terurai menjadi senyawa aromatik volatil dengan aktivitas kimia yang lebih rendah. Akibatnya, asap cair yang dihasilkan pada suhu tinggi memiliki kemampuan penghambatan kerak yang menurun, karena jumlah gugus fungsional $-\text{OH}$ dan $-\text{COOH}$ yang berperan dalam pengikatan ion logam semakin sedikit (Hasibuan *et al.*, 2024).

Secara keseluruhan, perbedaan suhu pirolisis (300 °C, 400 °C, dan 500 °C) memberikan pengaruh signifikan terhadap komposisi kimia dan aktivitas antikerak dari asap cair tempurung kelapa. Suhu yang terlalu rendah menghasilkan asap cair dengan kandungan asam tinggi namun kurang stabil, sedangkan suhu yang terlalu tinggi menyebabkan berkurangnya senyawa aktif akibat dekomposisi lanjut. Kondisi optimum berada pada suhu menengah (sekitar 400 °C), di mana keseimbangan antara senyawa asam dan fenolik menghasilkan daya hambat kerak yang paling tinggi (Hasibuan *et al.*, 2024). Oleh karena itu, pengaturan suhu pirolisis yang tepat menjadi faktor penting dalam menghasilkan asap cair dengan komposisi kimia paling efektif sebagai inhibitor kerak CaCO_3 yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C terhadap komposisi kimia asap cair tempurung kelapa serta hubungannya dengan kemampuan asap cair dalam menghambat pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3). Penelitian ini menggunakan metode *unseeded experiment*, yaitu metode pengujian tanpa penambahan bibit kristal yang digunakan untuk menentukan efektivitas inhibitor secara kuantitatif melalui hasil pengendapan CaCO_3 . Asap cair yang dihasilkan dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, dan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC–MS) untuk menentukan komponen senyawa kimia utama. Selanjutnya, hasil endapan CaCO_3 dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi kristal, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menganalisis struktur dan jenis kristal, serta *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengukur distribusi ukuran partikel. Melalui kombinasi analisis tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif mengenai pengaruh suhu pirolisis terhadap karakteristik kimia asap cair tempurung kelapa dan efektivitasnya sebagai inhibitor kerak CaCO_3 .

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada variasi suhu 300, 400, 500 °C.
2. Membandingkan efektivitas pertumbuhan kalsium karbonat (CaCO_3) dengan asap cair tempurung kelapa dan tanpa asap cair.

1.3. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh suhu asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis dalam menghambat pertumbuhan kerak CaCO_3 . Hasil penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan untuk memperoleh inhibitor kerak yang lebih efektif, mencegah pembentukan kerak pada peralatan-peralatan industri serta mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh pembentukan kerak.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kerak

Kerak didefinisikan sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi (Susilowati dkk., 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 mulai terjadi 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 (Sudarmaji dan Saroso, 2023). Kerak juga dapat terbentuk karena campuran air yang digunakan tidak sesuai. Campuran air tersebut tidak sesuai jika air berinteraksi secara kimia dan mineralnya mengendap jika dicampurkan. Contoh tipe air yang tidak sesuai adalah air laut dengan konsentrasi SO_4^{2-} tinggi dan konsentrasi Ca^{2+} rendah dan air formasi dengan konsentrasi SO_4^{2-} sangat rendah tetapi konsentrasi Ca^{2+} tinggi. Campuran air ini menyebabkan terbentuknya endapan CaSO_4 (Suharso dan Buhani, 2015).

Komponen khas kerak yang sering dijumpai adalah kalsium sulfat (CaSO_4), kalsium karbonat (CaCO_3): turunan dari kalsium bikarbonat), kalsium dan seng fosfat, kalsium fosfat, (sejumlah besar kalsium dan ortofosfat), silika dengan konsentrasi tinggi, besi dioksida (senyawa yang disebabkan oleh kurangnya kontrol korosi atau alami berasal dari besi yang teroksidasi), besi fosfat (senyawa

yang disebabkan karena pembentukan lapisan film dari inhibitor fosfat), mangan dioksida (mangan teroksidasi tingkat tinggi), magnesium silika (silika dan magnesium pada konsentrasi tinggi dengan pH tinggi), dan magnesium karbonat (magnesium dengan konsentrasi tinggi dan pH tinggi serta CO₂ tinggi) (Alimah, 2023). Contoh endapan kerak kalsium karbonat yang terdapat pada pipa ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Endapan kerak kalsium karbonat dalam pipa (Putranto *et al.*, 2020).

2.2. Pengendapan Senyawa Anorganik

Endapan adalah zat padat yang terbentuk dari larutan akibat reaksi kimia atau karena larutan menjadi lewat jenuh. Endapan dapat berupa kristal dengan ukuran tertentu atau berbentuk amorf tergantung pada kondisi pembentukan. Endapan yang berasal dari larutan akan terbentuk karena proses penurunan kelarutan pada kenaikan temperatur operasi dan kristal padat melekat erat pada permukaan logam (Lukum, 2020). Proses pengendapan senyawa-senyawa anorganik sering terjadi pada instrumen yang digunakan di industri. Hal ini dirasa menjadi permasalahan bagi industri yang proses kerjanya melibatkan air garam seperti proses desalinasi, ketel, industri minyak, dan gas. Hal ini disebabkan karena adanya unsur-unsur anorganik pembentuk kerak seperti logam kalsium dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Terakumulasinya endapan-endapan

dari senyawa anorganik dapat menimbulkan masalah seperti kerak. Endapan yang umum ditemui di pipa minyak antara lain kalsium karbonat (CaCO_3), kalsium sulfat termasuk gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan kalsium sulfat anhidrat (CaSO_4), serta barium sulfat (BaSO_4) (Alimah, 2023).

2.3. Pembentukan Kerak dan Endapan

Pembentukan kerak dan deposit endapan lain merupakan proses kristalisasi yang kompleks. Kecepatan pembentukan lapisan awal kerak dan kecepatan pertumbuhan yang berikutnya ditentukan melalui interaksi dari beberapa kecepatan proses nukleasi, difusi, reaksi kimia, kesesuaian pola geometris molekul-molekul dan atom-atom kristal kerak, dan lain-lain. Sebagian besar, walaupun tidak semua, unsur pokok pembentukan kerak mineral adalah kebalikan dapat larut, yaitu senyawa yang kelarutannya cenderung menurun dengan kenaikan suhu (Raharjo, 2020). Oleh karena itu, bila larutan lewat jenuh bersinggungan dengan permukaan transfer panas, mineral tersebut mengendap menjadi padatan karena daya larut setimbangnya menurun. Pada saat larutan menjadi lewat jenuh dan nukleasi terjadi, kondisi ini sangat cocok dan ideal untuk pertumbuhan kristal partikel kerak. Senyawa-senyawa yang dibawa air seperti kalsium sulfat, magnesium sulfat, barium sulfat, magnesium karbonat, kalsium karbonat, silikat, dan lain-lain dapat mengendap dan membentuk kerak sebagai akibat dari beda tekanan, perubahan temperatur, perubahan pH, dan lain-lain (Situmorang, 2012).

Proses pengendapan terjadi melalui 3 tahap, yaitu:

1. Nukleasi

Nukleasi terjadi ketika larutan mencapai kondisi lewat jenuh, sehingga gaya tarik antar ion menjadi cukup kuat untuk mengatasi gaya solvasi. Nukleasi dapat berlangsung secara homogen, apabila pembentukan inti kristal terjadi secara spontan di dalam larutan tanpa bantuan permukaan lain, atau secara heterogen, apabila nukleasi terjadi pada permukaan padatan seperti dinding

bejana atau partikel lain yang sudah ada. Tahap nukleasi ini merupakan langkah penentu dalam pembentukan endapan karena jumlah dan ukuran inti kristal yang terbentuk akan memengaruhi bentuk serta distribusi ukuran partikel pada tahap berikutnya (Lukum, 2020).

2. Pertumbuhan Kristal

Proses penambahan ion atau molekul dari larutan ke permukaan inti kristal yang sudah terbentuk. Pada tahap ini, kristal akan tumbuh secara perlahan membentuk struktur kisi tiga dimensi yang stabil. Pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain suhu, pH larutan, kecepatan pengadukan, dan tingkat lewat jenuh. Jika pertumbuhan kristal berlangsung lambat dalam kondisi stabil, maka akan dihasilkan endapan berbentuk kristal besar dan murni. Sebaliknya, jika proses berlangsung cepat akibat supersaturasi tinggi, maka endapan cenderung berbentuk amorf dan mengandung pengotor yang terperangkap di dalamnya (Lukum, 2020).

3. Aglomerasi

Pada tahap ini, kristal-kristal kecil yang terbentuk pada tahap sebelumnya akan saling bergabung (aglomerasi) atau berkoagulasi menjadi partikel yang lebih besar dan stabil. Proses ini sering disebut sebagai *aging* atau *digestion*, di mana endapan dibiarkan berada dalam larutan jenuh pada suhu tertentu selama beberapa waktu. Tujuannya adalah untuk memperbesar ukuran partikel, mengurangi pengotor yang terperangkap di dalam struktur kristal, serta meningkatkan kemurnian dan kemudahan filtrasi. Proses ini sangat penting terutama dalam pembentukan kerak anorganik di sistem perairan industri, di mana kondisi lingkungan seperti suhu dan pH dapat mempercepat proses aglomerasi serta pertumbuhan endapan (Situmorang, 2012).

2.3.1. Faktor Pembentukan Kerak

Dalam proses pembentukan kerak pada pipa industri, terdapat beberapa faktor yang memengaruhi terjadinya kerak. Faktor-faktor tersebut meliputi perubahan kondisi reservoir seperti penurunan tekanan dan perubahan suhu aliran fluida, pencampuran dua jenis air dengan komposisi mineral yang tidak seimbang, kondisi larutan yang memiliki zat terlarut melebihi batas kejenuhan, penguapan akibat peningkatan konsentrasi, proses pengadukan, waktu kontak antara kerak dan permukaan pipa, serta perubahan pH air (Raharjo, 2020). Menurut Raharjo (2020) beberapa faktor yang dapat mempengaruhi terbentuknya kerak antara lain yaitu:

1. Kualitas Air

Kualitas air sangat menentukan kemungkinan terbentuknya kerak. Air dengan kesadahan tinggi (mengandung banyak ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}) lebih mudah membentuk endapan seperti CaCO_3 (kalsium karbonat) atau CaSO_4 (kalsium sulfat). Selain itu, pH dan alkalinitas air juga berpengaruh, semakin tinggi pH, maka kelarutan CaCO_3 semakin menurun sehingga mudah mengendap menjadi kerak.

2. Temperatur Air

Suhu berperan besar terhadap kelarutan garam mineral. Pada umumnya, semakin tinggi suhu, kelarutan CaCO_3 menurun, sehingga endapan terbentuk lebih cepat. Selain itu, suhu tinggi juga mempercepat laju reaksi kimia dan pertumbuhan kristal, menyebabkan kerak cepat terbentuk dan menempel kuat pada permukaan logam pipa.

3. Supersaturasi (Kejenuhan Larutan)

Ketika air mengandung ion terlarut melebihi batas kelarutannya (keadaan lewat jenuh), maka ion-ion tersebut akan mengalami nukleasi dan kristalisasi, membentuk endapan padat yang menempel pada permukaan sistem.

4. Laju Aliran Fluida

Aliran yang terlalu lambat menyebabkan partikel-partikel endapan mudah mengendap di permukaan pipa, sementara aliran yang terlalu cepat dapat meningkatkan turbulensi dan menghambat pembentukan kerak. Jadi, kondisi laminar cenderung mempercepat pembentukan kerak.

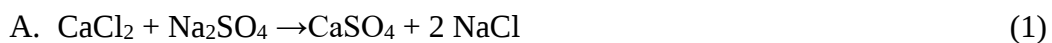
5. Adanya Pengotor atau Padatan Tersuspensi

Partikel halus atau zat pengotor di dalam air bisa menjadi titik awal nukleasi kristal (*nucleation site*), sehingga mempercepat terbentuknya kerak di permukaan logam.

6. Tekanan dan Komposisi Kimia Air

Perubahan tekanan dan komposisi ion seperti sulfat, silikat, dan bikarbonat juga dapat memicu pengendapan mineral. Tekanan rendah atau perubahan kondisi keseimbangan gas (CO_2) dapat menggeser reaksi sehingga mempercepat pembentukan kerak.

Beberapa reaksi yang menunjukkan terbentuknya endapan (deposit) antara lain (Suharso dan Buhani, 2015):



Kalsium sulfat terdapat dalam air terkontaminasi.



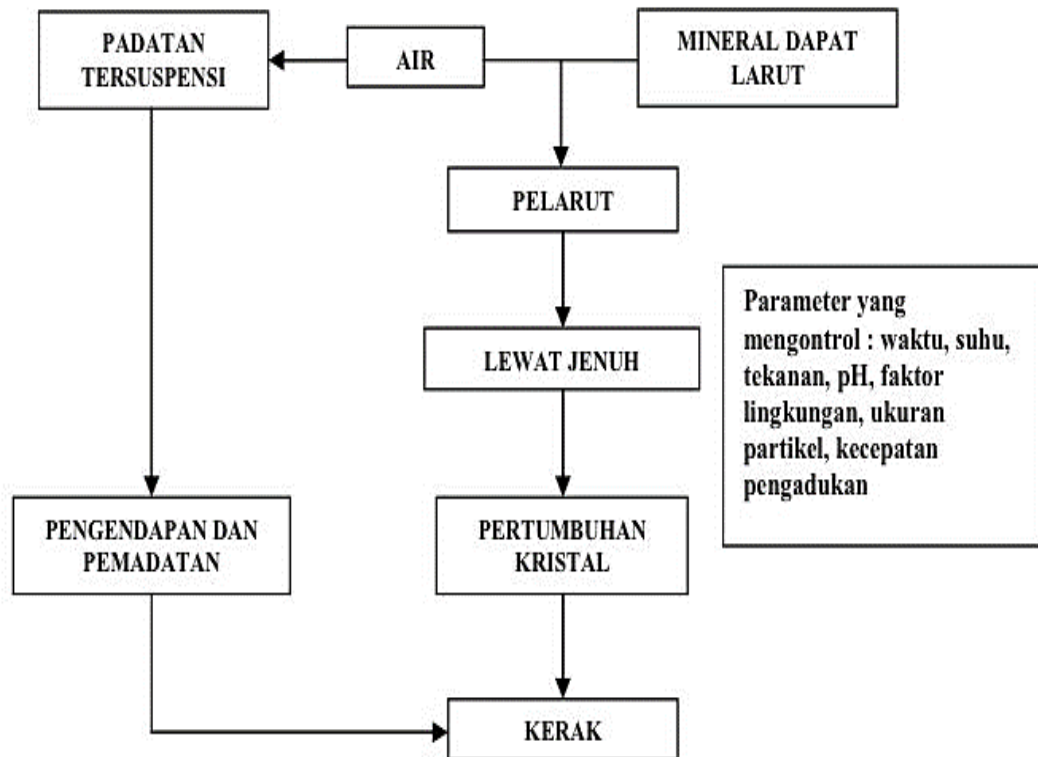
Barium sulfat terdapat dalam air terkontaminasi.



Kalsium karbonat terdapat dalam air terkontaminasi karena penurunan tekanan panas dan agitasi (pengadukan).

Pembentukan kerak dan deposit endapan lain adalah proses kristalisasi yang kompleks. Pada saat larutan menjadi lewat jenuh dan nukleasi terjadi, kondisi ini sangat cocok dan ideal untuk pertumbuhan kristal partikel kerak. Senyawa-senyawa yang dibawa air seperti kalsium sulfat, magnesium sulfat, barium sulfat, magnesium karbonat, kalsium karbonat, silikat, dan lain-lain dapat mengendap

dan membentuk kerak sebagai akibat dari beda tekanan, perubahan temperatur, perubahan pH, dan lain-lain. Skema mekanisme pembentukan kerak dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air (Suharso dan Buhani, 2015).

2.4. Kristal

Kristal terbentuk dari komposisi atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul zat padat yang memiliki susunan berulang dan jarak yang teratur dalam tiga dimensi. Pada hubungan lokal yang teratur, suatu kristal harus memiliki rentang yang panjang pada koordinasi atom-atom atau ion dalam pola tiga dimensi sehingga menghasilkan rentang yang panjang sebagai karakteristik dari bentuk kristal

tersebut. Berdasarkan struktur atom penyusunnya, bahan padat dibedakan menjadi tiga yaitu kristal tunggal (*monocrystal*), polikristal (*polycrystal*), dan amorf (Raharjo, 2020).

2.5. Faktor Pembentukan Kristal

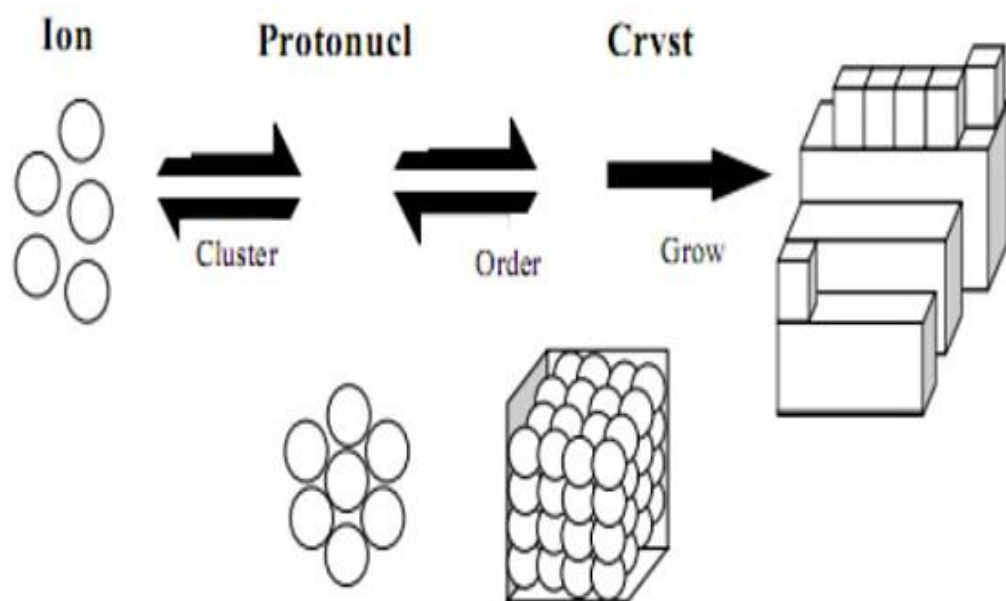
Ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan, tergantung terutama pada dua faktor penting, yaitu laju pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal. Laju pembentukan inti dapat dinyatakan dengan jumlah inti yang terbentuk dalam satuan waktu. Jika laju pembentukan inti tinggi, banyak sekali kristal yang akan terbentuk yang terdiri dari partikel-partikel kecil. Laju pembentukan inti tergantung pada derajat lewat jenuh dari larutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuh maka semakin besar kemungkinan untuk membentuk inti baru sehingga akan semakin besar laju pembentukan inti. Laju pertumbuhan kristal merupakan faktor penting lainnya yang akan mempengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan berlangsung. Semakin tinggi laju pertumbuhan maka kristal yang terbentuk akan semakin besar. Laju pertumbuhan kristal juga tergantung pada derajat lewat jenuh (Susilowati dkk., 2020).

2.5.1. Kristalisasi

Kristalisasi merupakan peristiwa pembentukan partikel-partikel zat padat dalam suatu fase homogen. Kristalisasi dari larutan dapat terjadi jika padatan terlarut dalam keadaan berlebih (di luar kesetimbangan), maka sistem akan mencapai kesetimbangan dengan cara mengkristalkan padatan terlarut. Kristalisasi memiliki dua tahap proses, yaitu tahap pembentukkan 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 (Suharso dan Buhani, 2015). Dalam keadaan larutan lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal. Inti kristal ini akan

terlarut bila ukurannya lebih kecil dari ukuran partikel kritis (inti 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 terjadi pertumbuhan kristal.

Laju pertumbuhan kristal ditentukan oleh laju difusi zat terlarut pada permukaan kristal dan laju pengendapan zat terlarut pada kristal tersebut. Daya dorong difusi zat-zat terlarut adalah perbedaan antara konsentrasi zat-zat terlarut pada permukaan kristal dan pada larutan. Kristal-kristal yang telah terbentuk mempunyai muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuklah kerak (Rahmadina *et al.*, 2020). Penjelasan sederhana pembentukan kerak (kristalisasi) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan kristalisasi (Mandela, 2017).

2.5.2. Kelarutan Endapan

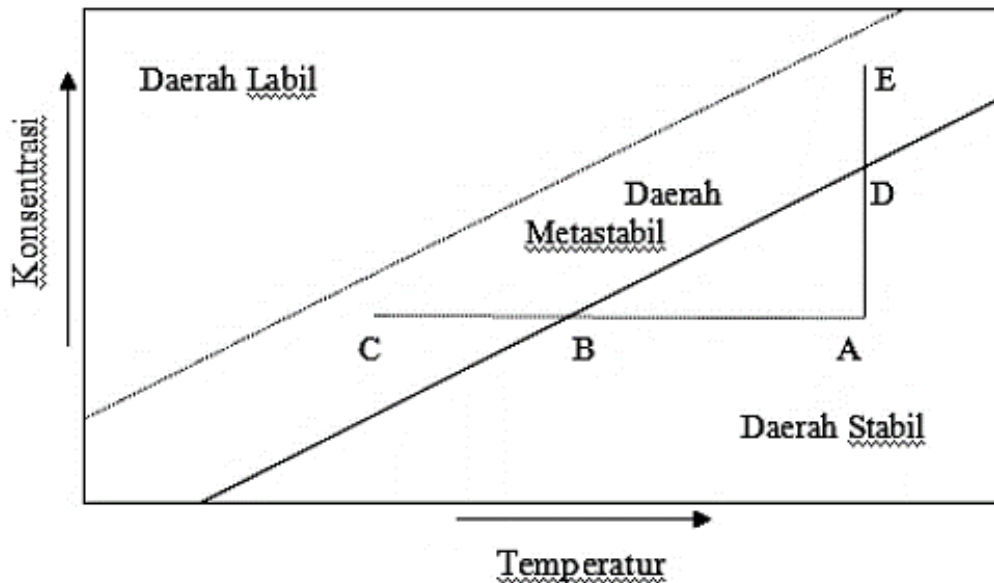
Endapan adalah zat yang memisahkan diri sebagai suatu fase padat dari larutan. Endapan mungkin berupa kristal atau koloid, dan dapat dikeluarkan dari larutan dengan penyaringan atau pemusingan. Endapan terbentuk jika larutan menjadi

terlalu jenuh dengan zat bersangkutan (Suharso dan Buhani, 2015). Kelarutan (S) suatu endapan adalah sama dengan konsentrasi molar dari larutan jenuhnya. Kelarutan tergantung berbagai kondisi, seperti temperatur, tekanan, konsentrasi, bahan-bahan lain dalam larutan itu, dan pada komposisi pelarutnya. Hasil kali kelarutan memungkinkan untuk menerangkan dan juga memperkirakan reaksi-reaksi pengendapan. Hasil kali kelarutan dalam keadaan sebenarnya merupakan nilai akhir yang dicapai oleh hasil kali ion ketika kesetimbangan tercapai antara fase padat dari garam yang hanya sedikit larut dalam larutan. Jika hasil kali ion berbeda dengan hasil kali kelarutan, maka sistem itu akan berusaha menyesuaikan, sehingga hasil kali ion mencapai nilai hasil kali kelarutan. Jadi, jika hasil kali ion dengan sengaja dibuat lebih besar dari hasil kali kelarutan, penyesuaian oleh sistem mengakibatkan mengendapnya garam larutan. Sebaliknya, jika hasil kali ion dibuat lebih kecil dari hasil kali kelarutan, kesetimbangan dalam sistem dicapai kembali dengan melarutnya sebagian garam padat ke dalam larutan. Hasil kali kelarutan menentukan keadaan kesetimbangan. Kelebihan zat pengendap yang terlalu banyak dapat mengakibatkan sebagian endapan melarut kembali, sebagai akibat bertambahnya efek garam atau akibat pembentukan ion kompleks (Ayogu *et al.*, 2020).

2.5.3. Derajat Lewat Jenuh

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 Saroso, 2023). Kondisi kelarutan lewat jenuh atau saturasi dapat diperoleh dengan cara jalan pendinginan larutan pekat panas, penguapan larutan encer, kombinasi proses penguapan, dan pendinginan serta dengan penambahan zat lainnya untuk menurunkan kelarutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuh, maka akan semakin besar kemungkinan pembentukan inti baru dan akan menyebabkan semakin

besarnya laju pembentukan inti yang mengakibatkan kristal akan terbentuk semakin besar. Adapun diagram yang menggambarkan larutan lewat jenuh yang dipengaruhi oleh temperatur dan konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram temperatur-konsentrasi (Suharso dan Buhani, 2015).

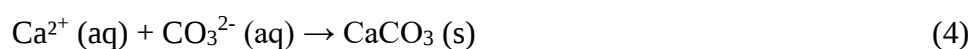
Berdasarkan Gambar 4, didapatkan garis tebal yang menunjukkan bahwa kelarutan normal zat terlarut dalam pelarut, sementara garis putus-putus mewakili kurva lewat jenuh, yang posisinya dalam diagram dipengaruhi oleh zat pengotor. Di daerah stabil (tidak jenuh), kristalisasi tidak akan terjadi. Di daerah metastabil (lewat jenuh), kristalisasi mungkin terjadi, tetapi tidak secara spontan. Di daerah labil, kristalisasi terjadi dengan nukleasi yang bisa berlangsung secara spontan. Jika larutan pada titik A didinginkan tanpa kehilangan pelarut hingga melewati kurva kelarutan sepanjang ABC, nukleasi spontan tidak akan terjadi sampai titik C tercapai. Pengurangan pelarut pada suhu konstan ditunjukkan oleh garis ADE, yang dapat menyebabkan supersaturasi (Suharso dan Buhani, 2015).

2.6. Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan suatu zat padat putih, tidak berbau, tidak berasa, terurai pada 825°C tak beracun, larut dalam asam dengan melepas CO_2 dan dijumpai di alam sebagai kalsit, napal, aragonit, travertin, marmer, batu

gamping, dan kapur, juga ditemukan bersama mineral dolomit ($\text{CaCO}_3 \text{ MgCO}_3$). Benar-benar tidak larut dalam air (hanya beberapa bagian per juta), kristalnya berwujud rombik/rombohedral dan dimanfaatkan sebagai obat penawar asam, dalam pasta gigi, cat putih, pembersih, bahan pengisi kertas, semen, kaca, plastik, dan sebagainya. Kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan salah satu endapan penyusun kerak yang menjadi masalah serius pada sebagian besar proses industri yang melibatkan air garam dan pada operasi produksi minyak bumi (Veronika dan Rohmawati, 2022).

Kalsium karbonat (CaCO_3) dibuat dari reaksi CaCl_2 dengan Na_2CO_3 dalam air, atau melewati CO_2 melalui suspensi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam air yang murni. Proses pembentukan CaCO_3 dengan model larutan ini berjalan cepat karena harga supersaturasi yang jauh lebih tinggi dibanding model larutan CaCO_3 . Campuran larutan yang dihasilkan bersifat basa (pH: 10-11) dan akan menurun mendekati pH isoelektrik kalsit yaitu sekitar 8,4 seiring dengan meningkatnya jumlah CaCO_3 yang terbentuk. Di dalam sistem larutan karbonat terdapat kesetimbangan antara CO_2 , ion CO_3^{2-} (karbonat), dan HCO_3^- (bikarbonat). Kalsium karbonat (CaCO_3) berupa endapan amorf putih terbentuk dari reaksi antara ion kalsium (Ca^{2+}) dalam bentuk CaCl_2 dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) dalam bentuk Na_2CO_3 (Svehla, 1990). Reaksi pembentukan endapan kalsium karbonat dapat digambarkan melalui persamaan 4 berikut:



Karbonat dari kalsium tidak larut dalam air dan hasil kali kelarutannya menurun dengan naiknya ukuran Ca^{2+} (Gibaud *et al.*, 2023).

2.6.1. Pengaruh Terbentuknya Kerak CaCO_3

Adanya pembentukan kerak menimbulkan banyak kerugian, antara lain menyebabkan gangguan transfer panas dan korosi pada pipa aliran fluida, (Suharso dan Buhani, 2015). Kerak CaCO_3 yang sering dijumpai pada pipa peralatan industri dapat menimbulkan berbagai masalah seperti mengecilnya diameter pipa sehingga menghambat aliran fluida. Hal ini menyebabkan suhu

semakin naik dan tekanan semakin tinggi sehingga kemungkinan pipa akan pecah. Pada operasi produksi minyak bumi, pembentukan kerak dapat mengurangi produktivitas sumur akibat tersumbatnya penorasi, pompa, valve, dan fitting (Ma'mun *et al.*, 2020). Oleh karena itu, perlu dilakukan metode pencegahan pembentukan kerak.

2.6.2. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak CaCO_3

Beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terbentuknya kerak kalsium klorida pada peralatan-peralatan industri adalah sebagai berikut:

1. Pengendalian pH

Pengendalian pH dengan cara penginjeksian asam (asam sulfat atau asam klorida) telah lama diterapkan untuk mencegah pengerasan oleh garam- garam kalsium, garam logam bivalen, dan garam fosfat. Kelarutan bahan 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. Asam sulfat dan asam klorida mempunyai tingkat bahaya yang cukup tinggi dalam penanganannya. Pencegahan terjadinya kerak pada air yang mengandung kesadahan tinggi (kira-kira 250 ppm CaCO_3) perlu adanya pelunakan menggunakan kapur dan soda abu (pengolahan kapur dingin) (Mubarak *et al.*, 2020).

2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air

Pelunakan air disebut dengan penurunan kesadahan, atau suatu metode yang digunakan untuk mengurangi konsentrasi ion kalsium, magnesium, dan ion-ion lainnya dalam air yang memiliki tingkat kesadahan tinggi. Untuk mencegah terjadinya kerak pada air yang mengandung kesadahan tinggi (+250 ppm CaCO_3) perlu adanya pelunakan dengan menggunakan kapur dan soda

abu (pengolahan kapur dingin). Masalah kerak tidak akan dijumpai jika yang digunakan adalah air bebas mineral karena seluruh garam-garam terlarut dapat dihilangkan. Oleh karena itu, pemakaian air bebas mineral merupakan metode yang tepat untuk menghambat kerak di dalam suatu sistem dengan pembebanan panas tinggi dimana pengolahan konvensional dengan bahan penghambat kerak tidak berhasil. Namun, penggunaan air bebas mineral dalam industri-industri besar membutuhkan biaya yang cukup tinggi sehingga dapat menurunkan efisiensi kerja (Nuryoto *et al.*, 2024).

3. Penggunaan inhibitor kerak

Inhibitor kerak merupakan bahan kimia yang ditambahkan secara kontinu ke dalam sistem aliran fluida untuk mengurangi atau mencegah pembentukan kerak pada permukaan peralatan. Senyawa ini bekerja dengan bereaksi terhadap zat penyebab kerak sehingga dapat menstabilkan ion penyusunnya dan menekan proses pertumbuhan kristal. Penggunaan inhibitor kerak dinilai sebagai metode yang efisien, ekonomis, serta mudah diterapkan dalam mencegah timbulnya kerak pada sistem perpipaan. Secara umum, inhibitor kerak dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan mekanisme kerjanya, yaitu inhibitor termodinamika dan inhibitor kinetika. Inhibitor termodinamika berfungsi sebagai agen pengompleks atau khelat yang mampu mengikat ion-ion pembentuk kerak, sehingga dapat mencegah proses kristalisasi dan pengendapan. Jenis ini umumnya efektif digunakan pada air dengan kadar garam rendah. Sementara itu, inhibitor kinetika bekerja dengan memperlambat laju pembentukan kerak melalui penghambatan tahap nukleasi dan pertumbuhan kristal, sehingga memungkinkan kondisi larutan tetap supersaturasi tanpa terjadi pengendapan kerak (Husna *et al.*, 2022). Pembentukan kerak kalsium karbonat dapat diminimalkan dengan penggunaan bahan kimia yang berperan sebagai inhibitor kerak. Senyawa ini berfungsi menghambat proses nukleasi dan pertumbuhan kristal kalsium karbonat, sehingga ion kalsium dan karbonat tetap berada dalam fase larutan dan tidak membentuk endapan padat. Penerapan inhibitor kerak dianggap sebagai metode yang efisien dan praktis dalam mencegah terbentuknya kerak pada

sistem perpipaan atau peralatan industri yang menggunakan air sebagai media fluida (Raharjo, 2020).

Menurut Al-Defferi (2006) syarat-syarat yang harus dimiliki senyawa kimia sebagai inhibitor kerak yaitu:

1. Inhibitor kerak harus menunjukkan kestabilan termal yang cukup dan efektif untuk mencegah terbentuknya air sadah dari pembentukan kerak.
2. Inhibitor kerak harus dapat merusak struktur kristal dan padatan tersuspensi lain yang mungkin akan terbentuk.
3. Inhibitor kerak juga harus memiliki tingkat keamanan yang tinggi dalam penggunaannya sehingga tidak menimbulkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan sekitar.

2.7. Mekanisme Kerja Inhibitor

Peran inhibitor dalam penghambatan kerak seperti kerak CaCO_3 dilakukan dengan berbagai macam mekanisme. Berikut ini adalah mekanisme pelarutan dan penghambatan kerak oleh inhibitor:

1. Penghambatan Ambang Batas (*Threshold Inhibition*)

Penghambatan ambang batas didefinisikan sebagai kemampuan dari senyawa kimia pada tingkat substoikiometri untuk mempertahankan kelarutan ion mineral melebihi batas normalnya. Pada dasarnya penghambatan dimulai dari penghambatan nukleasi untuk mencegah pengendapan lebih lanjut, yang mengganggu gugus ion untuk mencapai ukuran kritis untuk nukleasi dengan memblokir posisi pertumbuhan yang menguntungkan secara energi di permukaan. Akibatnya, inhibitor memisahkan dan melepaskan ion untuk mengulangi proses penghambatan. Fungsi inhibitor ambang batas melalui mekanisme adsorpsi stereospesifik ke bidang kristalografi dari pertumbuhan inti (Abdel-Aal dan Sawada, 2003). Adsorpsi mempengaruhi struktur kristal dan mendorong kristal secara termodinamis menuju pelarutan kembali daripada menuju pertumbuhan kristal secara spontan. Mekanisme ini

umumnya berlaku untuk molekul yang berukuran kecil. Kebanyakan inhibitor adalah senyawa yang mengandung fosfor seperti polifosfat anorganik, ester fosfat organik, dan fosfat amino organik. Selain itu, beberapa aminopolikarboksilat, fosfonopolikarboksilat, dan sulfonat juga dikenal sebagai inhibitor. Kehadiran gugus seperti -COOH , OH , dan -NH_2 meningkatkan laju pelarutan dan efisiensinya (Demadis *et al.*, 2006).

2. Khelat (*Chelates*)

Chelant adalah aditif kimia penting yang mengikat spesies kationik yang dapat larut (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , dan lain-lain) dengan cara mencegahnya bereaksi dengan *counter ion*. Hal ini dapat dicapai dengan mengubah muatan ion logam dari positif menjadi negatif dan mengunci logam ke dalam struktur cincin organik yang larut. Kompleks metal-khelat yang terbentuk larut dalam air sehingga tidak melekat pada permukaan panas. *Chelant* bertindak pada stoikiometri (satu molekul *chelant* bereaksi hanya dengan satu ion kalsium atau terkadang beberapa, tergantung pada pH) dan dosis tinggi diperlukan untuk hasil yang memuaskan. Contoh *chelant* adalah garam asam amino karboksilat (EDTA; asam dietilentriaminpentaasetat; asam nitrilotriasetat) dan polifosfonat. Inhibitor *chelating* memiliki keterbatasan dan blok pengendapan hanya untuk tingkat kejenuhan tertentu. Efisiensi dan efektivitas *chelant* sebagai inhibitor buruk, akibat persyaratan stoikiometri (Chauhan *et al.*, 2015). Agen pengompleks konvensional meskipun memiliki keuntungan yang jelas merupakan masalah besar karena tahan lama di lingkungan, remobilisasi ion logam beracun, dan implikasinya dalam eutropikasi sistem air alami. Oleh sebab itu, diperlukan penggantian dan penggunaan agen khelating dengan biodegradabilitas tinggi (Reineke *et al.*, 2000).

3. Distorsi Kristal (*Crystal Distortion*)

Pada mekanisme distorsi kristal, bahan kimia mempengaruhi susunan dan reaksi pertumbuhan kristal sehingga menyebabkan tidak biasa, bentuk yang tidak kristalin. Distorsi kristal juga menunda pertumbuhan kristal dari kristal yang biasanya sangat teratur. Molekul inhibitor menyerap ke situs

pertumbuhan kristal yang aktif, menghasilkan penghalangan, dan pencegahan pertumbuhan lebih lanjut. Selain itu, distorsi (kelainan pada kisi kristal) menciptakan tekanan internal, menjadikan kristal rapuh dan halus. Kristal halus ini tidak dapat menahan kekuatan mekanik yang diberikan oleh air dan akibatnya dihilangkan dengan mudah dari permukaan. Polimer dengan bobot molekul rendah antara 2000-5000 menunjukkan kemampuan dalam sifat distorsi kristal. Produk yang paling umum digunakan adalah asam poliakrilat (PAA), asam polimaleat (PMA), dan poliamida (Chauhan *et al.*, 2015).

4. Dispersi Kristal (*Crystal Dispersion*)

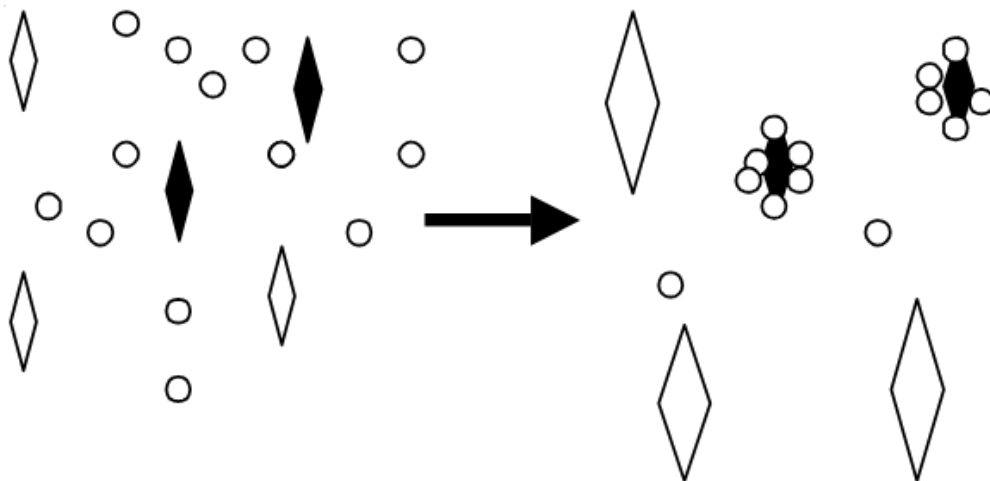
Dispersi adalah campuran stabil yang seragam dari bahan yang tidak larut dalam cairan. Ini terjadi ketika inhibitor secara kimia teradsorpsi ke permukaan kristal dan memberi tambahan muatan mengisi permukaan. Tegangan permukaan yang dihasilkan menyebabkan tolakan elektrostatik antara partikel yang bermuatan sama untuk menghindari aglomerasi, yang mengurangi pertumbuhan partikel dan akhirnya menyebabkan dispersi. Modifikasi permukaan mikrokristal oleh pendispersi mencegah kristal baru bergabung bersama untuk membentuk kumpulan material kerak yang besar dan juga menghambat penghubungan partikel. Adsorpsi inhibitor juga memberi hidrofilisitas pada kristal, yang membuat kristal tidak dapat menempel pada permukaan panas. Dispersi mempengaruhi interaksi partikel ke partikel (homogen) dan partikel ke permukaan (heterogen). Inhibitor tipe dispersi berinteraksi dengan permukaan kristal dan dengan memodifikasi permukaan menjauhkan kristal dari pembentukan kerak pada permukaan panas (Chauhan *et al.*, 2015).

Mekanisme kerja inhibitor kerak yaitu:

1. Inhibitor kerak dapat teradsorpsi pada permukaan kristal kerak pada saat mulai terbentuk. Inhibitor merupakan kristal yang besar yang dapat menutupi kristal yang kecil dan menghalangi pertumbuhan selanjutnya.
2. Bahan kimia dapat dengan mudah mencegah menempelnya suatu partikel-partikel pada permukaan padatan (Suharso *et al.*, 2010).

3. Terjadi proses adsorpsi ion atau molekul adsorbat pada permukaan kristal, dan memberikan aksi perlindungan terhadap proses pertumbuhan. Inhibitor dapat berikatan dengan permukaan kristal melalui perpindahan elektron dari senyawa inhibitor ke kristal membentuk ikatan koordinasi (Suharso dan Buhani, 2015).

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. Sedangkan 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 ($\circ$ = inhibitor, $\diamond$ = bibit kristal) (Chauhan *et al.*, 2015).

2.8. Asap Cair Tempurung Kelapa

Asap cair merupakan hasil kondensasi uap dari pembakaran bahan-bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Asap cair mengandung fenol, asam, dan karbonil. Manfaat asap cair dapat sebagai chelating agent yaitu tambahan makanan yang dapat mengikat logam yang terkandung dalam pangan.

Asap cair mengandung asam asetat dan asam karboksilat lainnya yang menyebabkan sifat asam pada asap cair. Asam asetat berasal dari pirolisis selulosa dan hemiselulosa yang terdapat pada tanaman (Djalil *et al.*, 2024). Pada dasarnya bahan baku untuk menghasilkan asap cair ini bermacam-macam, antara lain kayu, tandan kosong kelapa sawit, cangkang sawit, tempurung kelapa sawit, pelepah sawit, tempurung kelapa dan ampas hasil penggergajian. Asap cair memiliki banyak manfaat salah satunya yaitu sebagai inhibitor. Gumanti (2006) melaporkan bahwa komponen kimia destilat asap tempurung kelapa mengandung total fenol (5,5%), metil alkohol (0,37%), dan total asam (7,1%). Asap cair tempurung kelapa grade 2 memiliki warna yang lebih kekuningan jika dibandingkan dengan asap cair tempurung kelapa grade 3, namun sedikit lebih pekat kuningnya dari pada asap cair tempurung kelapa grade 1.

Asap cair grade 2 merupakan asap cair yang telah melewati tahapan destilasi dengan menggunakan suhu 250 – 300°C, kemudian dilakukan penyaringan zeolit. Asap cair ini memiliki warna kuning kecoklatan dan diorientasikan untuk pengawetan bahan makanan mentah. Asap cair grade 2 ini memiliki kualitas di bawah kualitas asap cair Grade 1 karena memiliki kadar fenol sebesar 0,64 % dan kadar asam sebesar 43,96 - 44,24 %. Namun, asap cair grade 2 ini memiliki kuantitas sebesar 1,8 - 2,1%, yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan kuantitas asap cair grade 1. Asap cair grade 2 ini hanya terdiri dari asap cair dengan bahan baku tempurung kelapa pada suhu pembakaran 300 °C dan 500 °C (Gumanti, 2006). Menurut Himawati (2010) asap cair grade 2, memiliki warna yang lebih coklat bening, kandungan tar 16,6% jauh lebih rendah, kandungan fenol 9,55%, karbonil 1,67%, dan aroma asapnya sudah berkurang. Asap cair Grade 2 tidak terlalu berbeda dengan grade 3 untuk kadar fenol, karbonil, dan asamnya. Namun, pada asap cair grade 2 untuk kadar tar dan poliaromatik hidrokarbon (PAH) seperti benzopirena sudah semakin berkurang, hal ini dikarenakan pada saat destilasi dengan suhu 250°C senyawa tersebut tidak ikut menguap karena titik didih kedua senyawa tersebut berada di atas 250°C.

Tabel 1. Kandungan asap cair tempurung kelapa serta titik didihnya.

Senyawa	Titik didih (°C, 750 mmHg)
Fenol	
- Guaikol	205
- 4-metilguaikol	211
- Eugenol	244
- Siringol	267
- Furfural	162
- Pirokatekol	240
- Hidrokuinon	285
- Isoeugenol	266
Karbonil	
- Metilglioksal	72
- Glikoaldehid	97
- Diasetil	88
- Formaldehid	21
Asam	
- Asam Asetat	118
- Asam Butirat	162
- Asam Propionat	141
- Asam Isovalerat	176

Sumber: Himawati (2010)

2.9. Metode *Unseeded Experiment*

Unseeded experiment adalah metode pembentukan kristal dengan cara tanpa penambahan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan. Hal ini dilakukan untuk melihat laju pertumbuhan kerak CaCO_3 . Metode ini biasanya diterapkan pada peralatan alat-alat industri yang masih baru sehingga dibutuhkan pencegahan pertumbuhan kerak CaCO_3 (Setiososari, 2017).

2.10. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa analisis dan karakterisasi kerak kalsium karbonat (CaCO_3). Adapun analisis yang dilakukan yaitu menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) untuk mengidentifikasi

struktur dari suatu senyawa dan mengetahui gugus fungsional utama dalam suatu sampel. Analisis menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) untuk mengetahui adanya komponen senyawa kimia pada inhibitor. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi CaCO_3 . Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengukur distribusi ukuran partikelnya. Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristal dari kerak kalsium karbonat (CaCO_3). Analisis dan karakterisasi yang dilakukan pada penelitian ini memiliki tujuan agar dapat mengetahui efektivitas asap cair tempurung kelapa dalam menghambat pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3).

2.10.1. Fourier Transform-infrared (FTIR)

Instrumen yang digunakan untuk mengukur serapan radiasi inframerah pada berbagai panjang gelombang disebut spektrofotometer inframerah. Pita-pita inframerah dalam sebuah spektrum dapat dikelompokkan menurut intensitasnya: *strong* (s), *medium* (m), dan *weak* (w). Suatu pita lemah bertumpang tindih dengan suatu pita kuat dinamakan bahu. Banyaknya gugus yang identik dalam sebuah molekul mengubah kuat relatif pita absorpsinya dalam suatu spektrum. Misalnya, suatu gugus tunggal dalam sebuah molekul menghasilkan absorpsi yang kuat. Sedangkan absorpsi suatu gugus CH, maka efek gabungan dari absorpsi CH ini akan menghasilkan suatu puncak yang bersifat medium (Fessenden dan Fessenden, 1986). Pada spektrofotometri IR, setiap gugus fungsi pada suatu senyawa akan menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang karakteristik. Sinar inframerah hanya dapat menyebabkan *vibrasi* (getaran) pada ikatan baik berupa rentangan (*stretching*) maupun berupa bengkokan (*bending*). Apabila radiasi inframerah dilewatkan melalui suatu cuplikan, maka molekul-molekulnya dapat menyerap (mengabsorpsi) energi dan terjadilah transisi di antara tingkat vibrasi dasar (*ground state*) dan tingkat energi tereksitasi (*excited state*) (Hulungo *et al.*, 2022).

Apabila sinar infra merah dilewatkan melalui cuplikan senyawa organik, maka sejumlah frekuensi diserap sedangkan frekuensi yang lain diteruskan atau ditransmisikan. Sinar infra merah mempunyai energi yang rendah dengan bilangan gelombang antara $600\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ atau sekitar ($1,7 \times 10^{-3}\text{ cm}$ sampai dengan $2,5 \times 10^{-4}\text{ cm}$). Sinar ini muncul akibat vibrasi atom-atom pada posisi kesetimbangan dalam molekul dan kombinasi vibrasi dengan rotasi menghasilkan spektrum vibrasi-rotasi (Kombongkila *et al.*, 2024).

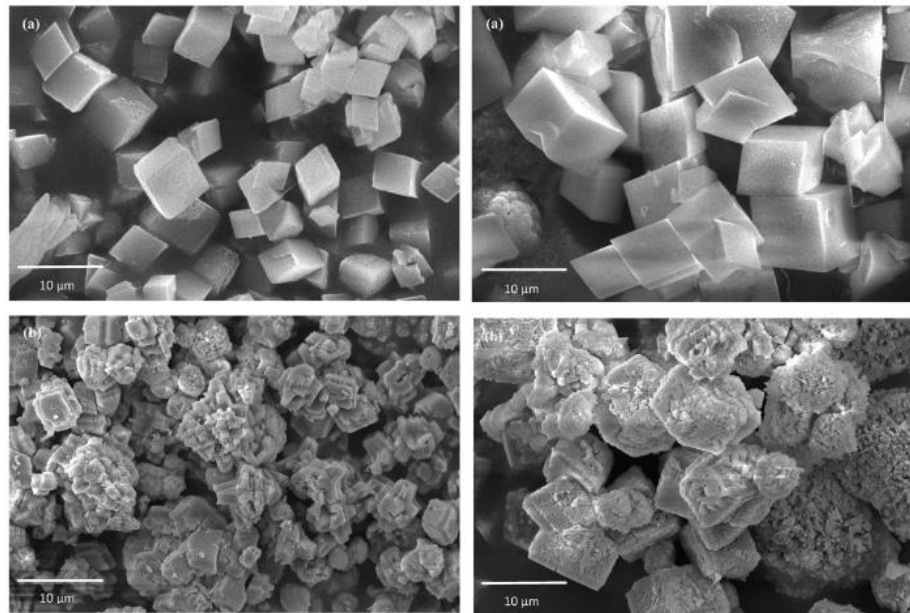
2.10.2. *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*

Gas Chromatography adalah salah satu teknik kromatografi yang hanya dapat digunakan untuk mendeteksi senyawa-senyawa yang mudah menguap. Kriteria menguap adalah dapat menguap pada kondisi vakum tinggi dan tekanan rendah serta dapat dipanaskan. *Gas Chromatography* merupakan metode analisis berdasarkan perbedaan waktu retensi akibat perbedaan mobilitas analit melalui suatu kolom. Perbedaan mobilitas dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu titik didih analit, gas, dan interaksi dengan fase padat dalam kolom. Prinsip dasar kromatografi adalah pemisahan senyawa-senyawa berdasarkan adanya perbedaan distribusi fasa gerak dan fasa diam. GC-MS adalah gabungan metode analisis antara GC dan MS. *Gas Chromatography* di sini hanya berfungsi sebagai sarana pemisah tanpa dilengkapi dengan detektor sebagaimana GC pada umumnya, tetapi yang berfungsi sebagai detektornya adalah MS. Kemampuan dan aturan pemisahannya akan mengikuti aturan pada GC, demikian pula aturan fragmentasi dan pola spektrum massa akan mengikuti aturan MS. Adanya gabungan kedua metode tersebut akan memberikan keuntungan yang lebih baik karena senyawa yang telah dipisahkan oleh GC dapat langsung dideteksi oleh MS. GC-MS mampu memisahkan komponen-komponen dalam suatu analit sekaligus menentukan jenis komponen tersebut melalui spektrum massanya (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

2.10.3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM adalah mikroskop elektron yang digunakan untuk mempelajari morfologi material. Sistem pencahayaan pada SEM menggunakan radiasi elektron yang mempunyai $\lambda = 200-0,1\text{\AA}$, daya pisah (resolusi) yang tinggi sekitar 5 nm sehingga dapat dicapai perbesaran hingga 100.000 kali dan menghasilkan gambar atau citra yang tampak seperti tiga dimensi karena mempunyai *depth of field* yang tinggi, sehingga SEM mampu menghasilkan gambar atau citra yang lebih baik dibandingkan dengan hasil mikroskop optik. Aplikasi mikroskop elektron ini tidak hanya terbatas pada analisis logam dan paduan di bidang metalurgi, melainkan dapat diaplikasikan di berbagai bidang lain, seperti farmasi, pertanian, biologi, kedokteran, industri bahan elektronika, dan komponen mesin serta pesawat terbang. Pada prinsipnya mikroskop elektron dapat mengamati morfologi, struktur mikro, komposisi, dan distribusi unsur. Untuk menentukan komposisi unsur secara kualitatif dan kuantitatif perlu dirangkaikan satu perangkat alat EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry*) atau WDS (*Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry*) (Rahmawati dan Nuraliyah, 2024).

Analisis SEM digunakan dalam penelitian ini untuk mempelajari morfologi kerak CaCO_3 . Menurut Suharso *et al* (2017), hasil pengamatan menunjukkan bahwa penambahan inhibitor dapat mengubah morfologi kerak CaCO_3 menjadi lebih kecil dan halus dibandingkan tanpa penambahan inhibitor ekstrak gambir yang termodifikasi. Pada gambar 6 ditunjukkan modifikasi kerak CaCO_3 hasil analisis menggunakan SEM.



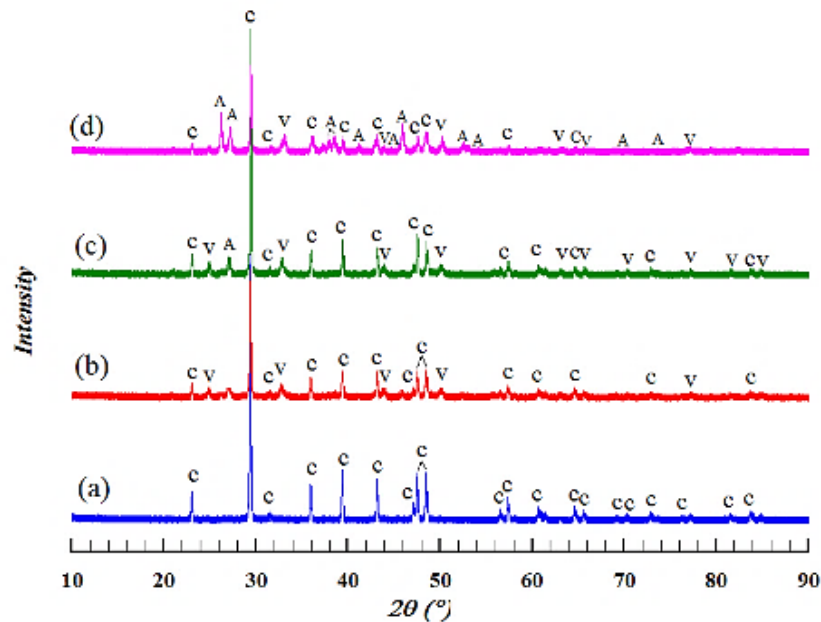
Gambar 6. Morfologi kristal CaCO_3 (a) tanpa inhibitor (b) dengan adanya inhibitor 300 ppm pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 dan 0,6 M (pembesaran x2500) (Suharso *et al.*, 2017).

2.10.4. X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin suatu material melalui pengukuran parameter struktur kisi dan ukuran partikel. Prinsip kerja XRD yaitu ketika sebuah sampel terkena sinar-X, sinar tersebut akan membuat elektron dalam atom sampel terlepas dari kulit dalam menuju kulit luar. Proses ini meninggalkan kekosongan pada kulit dalam. Ketika kekosongan tersebut diisi oleh elektron dari kulit luar, sinar-X fluoresensi akan dipancarkan. Energi dari sinar-X fluoresensi ini sesuai dengan perbedaan energi antara kulit elektron yang terlibat dan merupakan karakteristik khusus untuk setiap unsur, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur tersebut (Nurjanah *et al.*, 2024).

Analisis menggunakan XRD berfungsi untuk mengetahui struktur kristal CaCO_3 . Menurut Kardiman *et al* (2017), hasil analisis kerak CaCO_3 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor menggunakan XRD menunjukkan adanya perbedaan pola

XRD fasa kerak kalsium karbonat tanpa adanya penambahan inhibitor. Tanpa penambahan inhibitor fasa kerak CaCO_3 yang terbentuk yaitu adanya fasa kalsit dan vaterit. Gambar 7 merupakan difraktogram dari CaCO_3 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor atau aditif.



Gambar 7. Pola XRD kerak CaCO_3 (a) tanpa aditif asam tartrat, (b) aditif 4 ppm, (c) aditif 6 ppm dan (d) aditif 10 ppm (Kardiman *et al.*, 2017).

2.10.5. Particle Size Analyzer (PSA)

Particle Size Analyzer (PSA) digunakan untuk menganalisis partikel dalam suatu sampel yang berfungsi untuk menentukan ukuran partikel dan distribusinya.

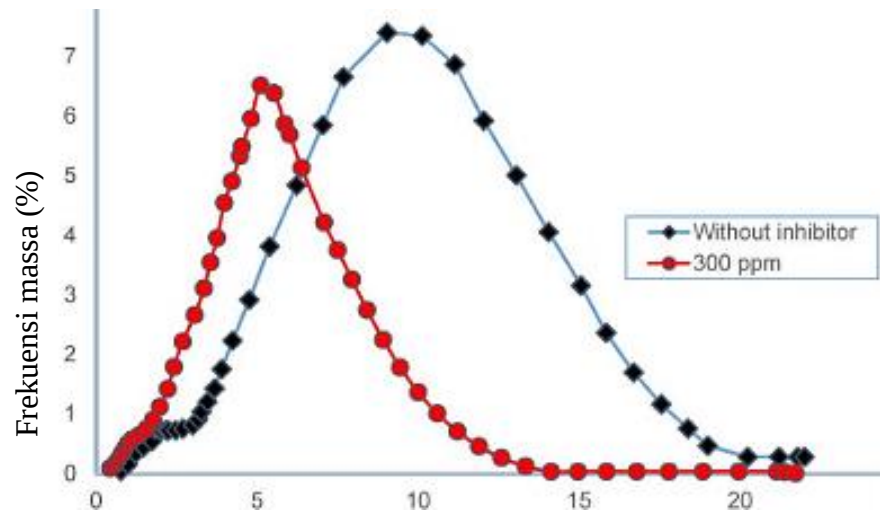
Distribusi ukuran partikel dapat diketahui melalui gambar yang dihasilkan.

Ukuran partikel dinyatakan dalam jari-jari untuk partikel yang berbentuk bola.

Prinsip kerja PSA yaitu dengan tipe *Dynamic Light Scattering* yaitu sampel akan ditembak dengan sinar laser dan akan terjadi penghamburan cahaya.

Penghamburan cahaya akan dideteksi pada sudut tertentu secara cepat dan hasil pengukuran droplet dinyatakan sebagai diameter dari droplet yang terdapat pada medium *disperse* (Waziz *et al.*, 2024).

Analisis menggunakan PSA dalam penelitian ini untuk mengetahui ukuran partikel kerak CaCO_3 . Menurut Suharso *et al.* (2017), hasil analisis kerak CaCO_3 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor menggunakan PSA mengalami perubahan distribusi ukuran partikel. Hasil analisis menunjukkan bahwa dalam larutan pertumbuhan 0,1 M rata-rata distribusi ukuran partikel kerak CaCO_3 tanpa inhibitor sekitar 10,6 μm dan setelah ditambahkan inhibitor rata-rata distribusi ukuran partikelnya menjadi 5,01 μm yang ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Distribusi ukuran Diameter partikel (mm) a inhibitor dan dengan adanya inhibitor 300 ppm pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 M (Suharso *et al.*, 2017).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 sampai Februari 2026 di Laboratorium Kimia Anorganik dan Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung. Analisis menggunakan instrumen FTIR dan SEM yang dilakukan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu (UPA) Universitas Lampung, GC-MS dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia, XRD Dan PSA dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang.

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu Spektrofotometer IR merek Cary 630 Agilent (Amerika Serikat), SEM merek ZEISS EVO MA 10 (Jerman), GC-MS merek Shimadzu QP 2010 SE (Jepang), XRD merek PANalitycal 29 MPD PW3040/60 (Belanda), PSA merek Cilas 1090 Liquid (Prancis), oven merek Innotech (Cina), waterbath merek PRIO, neraca analitik merek KERN ABT 220-4M, pH meter merek DrGray, spatula, statif, termometer, corong kaca, gelas-gelas plastik, pengaduk magnet, dan alat-alat gelas (labu ukur 1000 mL, gelas ukur 250 dan 500 mL, gelas kimia 500 dan 1000 mL).

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , akuades, kertas saring, dan asap cair tempurung kelapa.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pembuatan Asap Cair

Asap cair yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari tempurung kelapa melalui proses pirolisis. Pembuatan asap cair tempurung kelapa dilaksanakan di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Tempurung dicuci dan dikeringkan di bawah sinar matahari langsung. Tempurung yang sudah kering dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, kemudian dipirolisis selama 2-4 jam dengan variasi suhu 300, 400, dan 500 °C sampai asap cair berhenti menetes. Asap yang keluar dari reaktor dialirkan melalui pipa ke rangkaian kondensor, di mana 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 FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam asap cair tempurung kelapa dan analisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen senyawa kimianya.

3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa

Pembuatan inhibitor diawali dengan pembuatan larutan stok asap cair tempurung kelapa, kemudian dilakukan pengenceran bertingkat hingga diperoleh variasi konsentrasi 5, 10, 15, dan 20 ppm. Larutan stok 2000 ppm dibuat dengan melarutkan 2 g asap cair tempurung kelapa ke dalam labu ukur, kemudian ditambahkan akuades hingga volume 1000 mL dan dihomogenkan sehingga diperoleh larutan stok dengan konsentrasi 2000 ppm. Selanjutnya, larutan stok tersebut diencerkan untuk menghasilkan larutan dengan konsentrasi 100 ppm sebagai larutan kerja awal. Larutan 100 ppm dibuat dengan mengambil 25 mL larutan stok 2000 ppm, kemudian ditambahkan akuades hingga volume 500 mL dalam labu takar dan dihomogenkan. Setelah itu, larutan inhibitor dengan konsentrasi 5 ppm dibuat dengan mengambil 25 mL larutan 100 ppm, lalu ditambahkan akuades hingga volume 500 mL dalam labu takar dan

dihomogenkan. Prosedur yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 10, 15, dan 20 ppm dengan menyesuaikan volume larutan 100 ppm yang digunakan. Selanjutnya, nilai keasaman (pH) dari masing-masing larutan inhibitor diukur menggunakan pH meter. Untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam asap cair tempurung kelapa, dilakukan analisis menggunakan FTIR, sedangkan untuk mengidentifikasi komponen senyawa kimia yang terdapat di dalamnya dilakukan analisis menggunakan GC-MS.

3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaCO_3

Tahapan untuk pengujian asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor dalam pengendapan kristal CaCO_3 dengan metode *unseeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Kerak CaCO_3 Tanpa Penambahan Inhibitor dengan metode *Unseeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan mencampurkan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0005 M dan Na_2CO_3 0,0005 M masing-masing dalam 100 mL akuades. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80°C hingga homogen. Kemudian larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0005 M dan larutan Na_2CO_3 0,0005 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80°C agar terbentuk kerak CaCO_3 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan CaCO_3 yang terbentuk kemudian dimasukkan dalam waterbath pada suhu 80°C selama 4 jam untuk mencapai kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 3 jam. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan Na_2CO_3 sebesar 0,0010; 0,0020; dan

0,0030 M untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak CaCO_3 tanpa penambahan inhibitor sebesar 0,0005; 0,0010; dan 0,0150 M. Endapan yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi yang paling efektif, sehingga dapat dianalisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kristal menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor Kerak CaCO_3 dengan metode *Unseeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan mencampurkan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0005 M dan Na_2CO_3 0,0005 M masing-masing dalam 100 mL inhibitor asap cair tempurung kelapa 5 ppm. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0005 M dan Na_2CO_3 0,0005 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak CaCO_3 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan CaCO_3 yang terbentuk dimasukkan ke dalam waterbath pada suhu 80 °C selama 4 jam untuk mencapai kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3 jam. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan Na_2CO_3 sebesar 0,0010; 0,0020; dan 0,0030 M serta pada variasi inhibitor 5, 10, 15 dan 20 ppm menggunakan asap cair tempurung kelapa. Endapan yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kristal menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

3.3.3.3. Prosedur Pengujian Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak CaCO_3 pada Sistem dengan Laju Alir

Larutan pertumbuhan disiapkan dengan melarutkan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0030 M dan Na_2CO_3 0,0030 M masing-masing ke dalam 1000 mL larutan inhibitor asap cair tempurung kelapa pada konsentrasi 20 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 CaCO_3 .

Larutan yang mengandung endapan CaCO_3 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, dan ditimbang untuk memperoleh berat awal. Setelah pengujian, kupon logam dikeringkan dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat akhir, kemudian selisih berat digunakan untuk menentukan massa endapan dan menghitung efektivitas inhibitor. Hal ini dilakukan secara berulang pada berbagai variasi konsentrasi untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap pembentukan kerak CaCO_3 .

3.4. Analisis Data

Data yang diperoleh berupa jumlah endapan terhadap waktu dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi campuran inhibitor, masing-masing diplot sebagai jumlah endapan terhadap waktu menggunakan Microsoft Excel. Morfologi kerak CaCO_3 , sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan SEM. Perubahan ukuran partikel dari kelimpahan CaCO_3 , pada masing-masing endapan dari setiap percobaan yang dilakukan juga dianalisis dengan PSA. Struktur kristal CaCO_3 , sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis dengan XRD.

Data yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui efektivitas dari asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan endapan CaCO_3 , dengan menggunakan persamaan 5:

$$\% \text{Efektivitas inhibitor} = \frac{C_a - C_b}{C_a - C_0} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

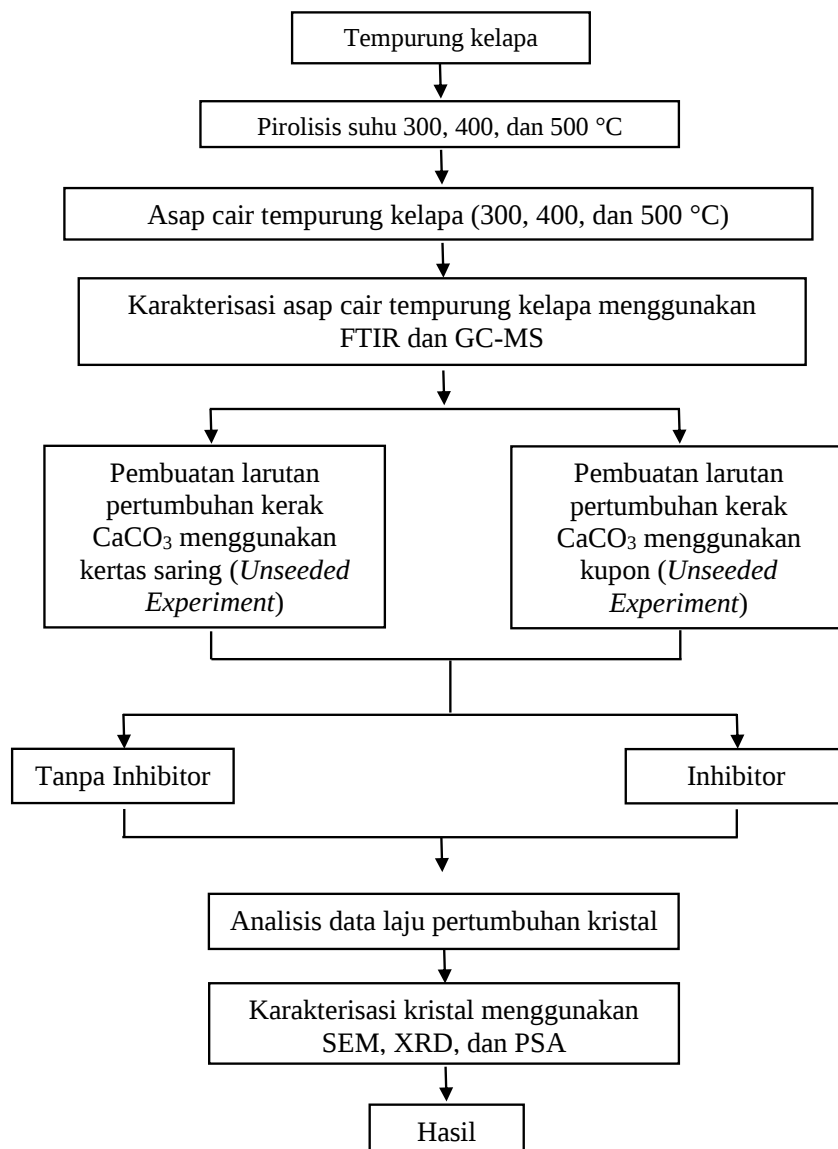
C_a = berat endapan dengan penambahan inhibitor pada saat kesetimbangan (g/L)

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

C_0 = berat endapan awal (g/L)

3.5. Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 9. Diagram alir penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

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

1. Suhu pirolisis berpengaruh terhadap komposisi senyawa kimia, kestabilan, dan efektivitas asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor kerak CaCO_3 . Asap cair hasil pirolisis suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ menunjukkan kestabilan terbaik karena tidak mengalami pertumbuhan jamur selama periode pengamatan, serta mengandung gugus fungsi aktif seperti hidroksil ($-\text{OH}$), karbonil ($\text{C}=\text{O}$), dan fenolik yang berperan dalam penghambatan kerak.
2. Nilai efektivitas inhibitor tertinggi sebesar 95,03% diperoleh pada asap cair hasil pirolisis suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm dan konsentrasi larutan pertumbuhan 0,0005 M. Efektivitas inhibitor meningkat seiring bertambahnya konsentrasi inhibitor dan menurun seiring meningkatnya konsentrasi larutan pertumbuhan CaCO_3 .
3. Hasil analisis SEM dan XRD menunjukkan bahwa penambahan inhibitor asap cair tempurung kelapa mengubah morfologi kristal kerak CaCO_3 menjadi lebih kecil, tersebar, dan tidak seragam, dengan fasa yang tetap didominasi oleh kalsit dan aragonit.
4. Analisis PSA menunjukkan bahwa penambahan inhibitor menurunkan ukuran partikel rata-rata kerak CaCO_3 dari 7.470 nm menjadi 4.413 nm dengan distribusi partikel yang lebih seragam.

5.2. Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan kajian lebih lanjut terkait efektivitas inhibitor dalam menghambat pembentukan kerak CaCO_3 dengan menggunakan asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ yang divariasikan berdasarkan grade (grade 1, grade 2, dan grade 3) guna mengetahui pengaruh perbedaan komposisi kimia terhadap kemampuan inhibisinya. Selain itu, metode penentuan efektivitas inhibitor disarankan menggunakan metode kupon logam sebagai pengganti kertas saring, karena lebih representatif dalam menggambarkan kondisi nyata pada sistem perpipaan sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, N., and Sawada, K. 2003. Inhibition of adhesion and precipitation of CaCO_3 by aminopolyphosphonate. *Journal of Crystal Growth*. 256(1–2): 188–200.
- Al-Defferi, N. S. 2006. Heat transfer measurement as a criterion for performance evaluation of scale inhibition in MSF plants in Kuwait. In *Desalination*. 204: 423-436.
- Alimah, S. 2023. Potensi Pembentukan Kerak Pada Instalasi Desalinasi Nuklir Med Dengan Air Umpan Dari Teluk Manggris. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*. 10(3): 149–156.
- Amjad, Z. 2010. *Calcium Carbonate Scale Formation and Control*. Springer International Publishing.
- Boluda-Botella, N., Saquete, M. D., Martinez-Moya, S., Morales-Paredes, C., and Rodriguez-Diaz, J. 2024. Analysis of Calcium Carbonate Scales in Water Distribution Systems and Influence of the Electromagnetic Treatment. *Water*. 16(11): 1554.
- Bots, P., Benning, L., Rodriguez-Blanco, J. D., Roncal-Herrero, T., and Shaw, S. 2012. Mechanistic Insights Into The Crystallization of Amorphous Calcium Carbonate. *Crystal Growth and Design*. 12(7): 3806–3814.
- Bridgwater, A. 2012. Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 38(2): 68–94.
- Chauhan, K., Sharma, P., and Chauhan, G. 2015. Removal/Dissolution of Mineral Scale Deposits. In *Mineral Scale and Deposits*. 701–720.
- Chikezie, A. P., Ezugwu, M. I., and Ifeanyi, E. F. 2020. Principle of Common-ion Effect and its Application in Chemistry: a Review. *Journal of Chemistry Letters*. 1(2): 77–83.

- Demadis, K. D., Lykoudis P, Raptis, R. G., and Mezei, G. 2006. Phosphonopolycarboxylates as Chemical Additives for Calcite Scale Dissolution and Metallic Corrosion Inhibition Based on a Calcium-Phosphonotricarboxylate Organic–Inorganic Hybrid. *Crystal Growth Desalination*. 6(2): 1064–1067.
- Djalil, J. P., Salimi, Y. K., Iyabu, H., Bialangi, N., Mohamad, E., and Kunusa, W. R. 2024. Karakteristik Kimia Dan Organoleptik Asap Cair Tempurung Kelapa Dalam Menurunkan Cemaran Logam Timbal (Pb) Pada Ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*). *Jambura Fish Processing Journal*. 6(1): 52–65.
- Eichinger, S., Bohm, M., and Purgstaller, B. 2022. Formation and Stability of Calcium Carbonate Polymorphs: The Role of Solution Chemistry and Kinetics. *Crystal Growth and Design*. 22(4): 2458–2470.
- Fessenden, R., and Fessenden, J. 1986. *Kimia Organik Jilid 1*. Erlangga.
- Gibaud, A., Younas, D., Matthews, L., Narayanan, T., Longkaew, K., Hageberg, I. U., Chushkin, Y., Breiby, D. W., Chattopadhyay, B., and Gilbert, E. P. 2023. Insights Into The Precipitation Kinetics Of CaCO_3 Particles In The Presence Of Polystyrene Sulfonate Using In Situ Small-Angle X-ray Scattering. *Journal of Applied Crystallography*. 56: 1114–1124.
- Gopi, D., Bhuvaneshwari, N., Indira, J., and Kavitha, L. 2013. Influence of Additives on Calcium Carbonate Polymorph Formation. *Journal of Crystal Growth*. 362(3): 150–156.
- Gumanti, F. 2006. *Kajian Sistem Produksi Destilat Asap Tempurung Kelapa dan Pemanfaatannya sebagai Alternatif Bahan Pengawet Mie Basah*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret.
- Haji, A. G., Mas'ud, Z. A., Lay, B. W., Sutjahjo, S. H., dan Pari, G. 2012. Karakterisasi Asap Cair Hasil Pirolisis Sampah Organik Padat (Characterization Of Liquid Smoke Pyrolyzed From Solid Organic Waste). *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 16(3): 1–8.
- Hasibuan, R., Limbong, Y. W., Fazillah, R., and Pramananda, V. 2024. Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Liquid Smoke Yield in Coconut (*Cocos nucifera* L.) Shells Pyrolysis Process. *E3S Web of Conferences*. 560: 3–6.
- Hasson, D., and Semiat, R. 2005. Scale Control in Saline and Wastewater Desalination. *Israel Journal of Chemistry*. 46: 97–104.
- Himawati, E. 2010. *Pengaruh Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa Destilasi dan Redestilasi Terhadap Sifat Kimia, Mikrobiologi dan Sensoris Ikan Pindang Layang (*Decapterus spp*) Selama Penyimpanan*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret.

- Hoseini, B., Rahimi, M., and Karimi, A. 2023. Application of Particle Size Distribution and Polydispersity Index in Particle Characterization. *Scientific Reports*. 13(2): 18–22.
- Hulungo, C., Wenas, D. R., dan Rondonuwu, A. 2022. Identifikasi Komposisi Mineral Batuan Teralterasi Menggunakan Spektroskopi SEM-EDX dan FTIR Pada Daerah Manifestasi Panas Bumi di Desa Mototompiaan Kecamatan Modayg Kabupaten Bolaang Mongondow Timur. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*. 3(1): 8–12.
- Husna, U. Z., Elraies, K. A., Shuhili, J. A. B. M., and Elryes, A. A. 2022. A Review: The Utilization Potency Of Biopolymer as An Eco-Friendly Scale Inhibitors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 12(4): 1075–1094.
- Ismail, N., Alshami, A. S., and Hussein, I. A. 2021. Synthesis and evaluation of a novel polyacrylamide functionalized nano-silica as a calcium carbonate inhibitor in upstream applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 20(2): 109–118.
- Kardiman, Widiyanto, E., Bayuseno, A. P., dan Muryanto, S. 2017. Analisis Pertumbuhan Fasa Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Akibat Penambahan Asam Tartrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) sebagai Aditif. *Barometer*. 2(2): 48–51.
- Ketrane, R., Saidani, B., Gil, O., Leleyter, L., and Baraud, F. 2009. Efficiency of Scale Inhibitors on Calcium Carbonate Precipitation. *Desalination*. 249(3): 1397–1404.
- Khamis, M., Abdullah, A., and Rahman, N. 2024. Morphological Characteristics and Stability of Calcium Carbonate Polymorphs in Scaling Systems. *Journal of Materials Research and Technology*. 28(6): 1125–1136.
- Kistriyani, L., Abu, D. M., Mawaddah, M., and Sari, Y. D. 2018. Invasion of Saturated Vapor Coconut Shell The Transition Obat Merah to Liquid Smoke Ccoconut Shell as Solutions In The Treatment of Wound Outside. *International Journal of Science and Technology*. 4(3): 1–10.
- Komarayati, S., Gusmailina., dan Efiyanti, L. 2018. Karakteristik dan Potensi Pemanfaatan Asap Cair Kayu Trema, Nani, Merbau, Matoa, dan Kayu Malas *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 36(3): 219-238.
- Kombongkila, O., Taunaumang, H., dan Tumimomor, F. R. 2024. Analisis Struktur Film Tipis Disperse Orange-3 Hasil FTIR. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*. 5(1): 45–50.
- Korchef, A., and Touaibi, M. 2020. Effect of pH and temperature on calcium carbonate precipitation by CO_2 removal from iron-rich water. *Water and Environment Journal*. 34(2): 331–341

- Luditama, C. 2019. *Isolasi dan Pemurnian Asap Cair Tempurung Kelapa Secara Pirolisis dan Destilasi*. Institut Pertanian Bogor.
- Lukum, A. 2020. *Buku Ajar Dasar-Dasar Kimia Analitik*. Erlangga.
- Ma'mun, H., Bayuseno, A. P., dan Muryanto, S. 2020. Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) di Dalam Pipa Beraliran Laminer Pada Laju Alir 30 ml/menit Hingga 50 ml/menit dan Penambahan Aditif Asam Malat. *Journal Dintek*. 12(1): 100–105.
- Mandela, B. S. 2017. Pembentukan Kerak Magnesium Karbonat MgCO_3 pada Laju Alir 30 ml/menit dengan Konsentrasi Mg^{2+} 3000 ppm dan 4000 ppm. *Traksi*. 17(2): 26–39.
- Margareta, M. A. H., dan Wonorahardjo, S. 2023. Optimasi Metode Penetapan Senyawa Eugenol dalam Minyak Cengkeh Menggunakan Gas Chromatography – Mass Spectrum dengan Variasi Suhu Injeksi. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*. 6(2): 95–103.
- Morse, J. W., and Arvidson, R. 2022. The Dissolution Kinetics of Major Sedimentary Carbonate Minerals. *Earth-Science Review*. 58(1): 51–84.
- Mubarak, S., Jokosiswor, S., dan Mulyatno, I. P. 2020. Pengaruh Penambahan Inhibitor CaCO_3 Terhadap Laju Korosi Baja SS 400 dalam Larutan Air Laut Buatan. *Teknik Perkapalan*. 8(3): 339–346.
- Muryanto. 2010. Pengaruh Kondisi Larutan Terhadap Pembentukan Kristal Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Jurnal Sains Dan Teknologi*. 9(1): 45–52.
- Muryanto, S., Bayuseno, A. ., Soediono, W., Mangestiyono, W., and Sutrisno. 2012. Development Of a Versatile Laboratory Project for Scale Formation and Control. *Education for Chemical Engineers*. 34(2): 1–7.
- Musmuliadi. 2020. Pencegahan Terbentuknya Produk Scale Pada Pipa Produksi Area Minas Dengan Injeksi Chemical Scale Inhibitor. *Jurnal Surya Teknika*. 7(1): 69–76.
- Mustafiah, M., Makhsud, A., dan Aladin, A. 2016. Pengaruh Suhu Terhadap Produksi Asap Cair Dari Cangkang Sawit. *Journal of Chemical Process Engineering*. 1(1): 1–6.
- Nurjanah, R., Zamhari, M., dan Yerizam, M. 2024. Pemanfaatan Bottom Ash Batubara Menjadi Silika Gel Sebagai Absorben Pb^+ pada Limbah Industri Minuman di Bayuasin. *Innovative: Journal Of Social Science Research*. 4(5): 775–786.
- Nuryoto, N., Hartono, R., dan Rahmayetty, R. 2024. Pengolahan Air Menggunakan Proses Demineralisasi dengan Memanfaatkan Resin Penukar Ion: Studi Pengaruh Laju Alir dan Tinggi Resin. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 22(2): 393–400.

- Oktaviyanti, A. 2024. Studi Penambahan Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode Seeded Experiment. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Putranto, W. A., Khaeruman, K., dan Susanto, S. 2020. Pengaruh Laju Aliran, Suhu Dan Aditif Asam Tartrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) Terhadap Morfologi Dan Fasa Kristal Pada Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Jurnal Ilmiah Momentum*. 16(2).
- Raharjo, S. 2020. Pembentukan Pengendalian Kerak Mineral di dalam Pipa. *Universitas Muhammadiyah Semarang*.
- Rahmadina, E., Nurjanah, S., Nurhadi, B., Muhaemin, M., dan Widyasanti, A. 2020. Penggunaan Skala Proses Pengadukan Terhadap Rendemen Patchouli Alcohol pada Kristalisasi Minyak Nilam. *Prosiding Seminar Nasional Agribisnis*. Universitas Padjajaran. Bandung.
- Rahmah, S. 2007. *Pengaruh Suhu Pirolisis, Proses Redestilasi dan Perlakuan Mekanik terhadap Rendemen dan Kualitas Asap Cair Tempurung Kelapa*. Tesis S2. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- 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.
- Reineke, F., Groth, T., Heise, K., Joentgen, W., Muller, N., and Steinbuchel, A. 2000. Isolation and Characterization Of Achromobacter Xylosoxidans T7 Capable Of Degrading Toluidine Isomers. *FEMS Microbiology Letters*. 188(2): 41–46.
- Ridhuan, K., Mafruddin., dan Rasyid A.A. 2020. Optimasi Pembakaran Pada Reaktor Pirolisis Terhadap Efisiensi Energi. *Turbo: Jurnal Teknik Mesin*. 9(1): 45–52.
- Rosadinah, N. 2024. Pemanfaatan Ekstrak Sabut Sawit, Asap Cair Cangkang Sawit dan Campurannya Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4). *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Sahrum, R. P., Syaiful, A. Z., dan Al-Gazali. 2021. Uji Kualitas Asap Cair Tempurung Kelapa Dan Serbuk Gergaji Kayu Metode Pirolisis. *Saintis*. 2(2): 72–78.
- Setiososari, E. 2017. *Studi Penggunaan Asap Cair sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode Seeded Experiment*. Skripsi. Universitas Lampung.
- Situmorang, M. 2012. *Kimia Analitik I (Kimia Analitik Dasar)*. Erlangga.

- Sudarmaji, A. T., dan Saroso, H. 2023. Pengaruh Penambahan Larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Terhadap Pembentukan Kerak Pada Penguapan Nira Tebu. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 7(2): 634–641.
- Suharso dan Buhani. 2011. Efek Penambahan Aditif Golongan Karboksilat dalam Menghambat Laju Pembentukan Endapan Kalsium Sulfat. *Jurnal Natur Indonesia*. 13(2): 100–104.
- Suharso dan Buhani. 2015. Penaggulangan Kerak. In *Graha Ilmu* (Vol. 91).
- Suharso, Buhani, and Aprilia, L. 2014. Influence of calix[4]arene derived compound on calcium sulphate scale formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26(18): 6155–6158.
- Suharso, Buhani, and Suhartati. 2010. The Role Of C-Methyl-4,10,16,22-Tetramethoxy Calix[4] Arene as Inhibitor Of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Indonesian Journal of Chemistry*. 9(2): 206–210.
- Suharso, Buhani, Utari, H. R., Tugiyono., and Satria, H. 2019. Influence Of Gambier Extract Modification as Inhibitor Of Calcium Sulfate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 22–28.
- Suharso, Chandra, N. M., Kiswandono, A. A., Tugiyono, and Buhani. 2022. Extract Of Mangosteen Peel (*Garcinia mangostana L.*) as Calcium Carbonate Scale Inhibitor. *Rasayan Journal of Chemistry*. 15(3): 1799–1805.
- Suharso, Reno, T., Endaryanto, T., and Buhani. 2017. Modification of Gambier extracts as green inhibitor of calcium carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Journal of Water Process Engineering*. 18: 1–6.
- Susilowati, Aqil., Wobowo, dan Karaman. 2020. Pengaruh Pengadukan dan Konsentrasi ZnCl_2 Pada Pembentukan Kristal Barium Sulfat dengan Metode Batch Kristalisasi. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*. 9(2): 92–97.
- Svehla, G. 1990. *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*. PT Kalman Media Pustaka.
- Ton, S., Priyadi, D. A., dan Darma, Y. Y. 2020. Pembuatan Asap Cair Guna Mendukung Pertanian Organik di Desa Bulusari, Kecamatan Kalipuro, Kabupaten Banyuwangi. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (Indonesian Journal of Community Engagement)*. 6(4): 253–259.
- Veronika, A. O., dan Rohmawati, L. 2022. Sintesis CaCO_3 dari Dolomit Bangkalan dengan Metode Leaching. *Sains Dan Matematika*. 7(1): 39–42.
- Wang, X., Liu, P., and Zhao, Y. 2024. Effect of Scale Inhibitors on Nucleation and Crystallization of Calcium Carbonate. *Minerals*. 15(6): 947–955.

- Waziz, W., Fitriani, F., dan Riko Aulia, R. 2024. Analisis Ukuran Partikel Nanosilica Pada Proses Alkali Fusion Silica Scaling Geothermal Dieng Menggunakan KOH. *Journal of Mechanical Engineering*. 1(1): 23–32.
- Wijanarko, S. A., Wardani, E., dan Sa'diyah, K. 2022. Pembuatan Asap Cair dari Ampas Tebu Menggunakan Metode Pirolisis. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 8(2): 85–92.
- Xinyu Guo, Joy, J. S. C., Cheng, Y., Zhao, X., Liu, Z., and Xu, Y. 2021. Scale Inhibitors for Industrial Circulating Water Systems: A Review. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 43(6): 517–525.
- Zhang, J., Liu, J., Liu, R., Li, P., and Cheng, C. 2015. Effect of the carbonization temperature on the properties of biochar produced from the pyrolysis of crop residues. *BioResources*. 10(2): 3053–3071.