

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR
KERAK MAGNESIUM KARBONAT ($MgCO_3$) MENGGUNAKAN
METODE *UNSEEDED EXPERIMENT***

(SKRIPSI)

Oleh

AGUNG HASINTONGAN PARULIAN HASIBUAN

2217011076



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

ABSTRAK

STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR KERAK MAGNESIUM KARBONAT ($MgCO_3$) MENGGUNAKAN METODE UNSEEDED EXPERIMENT

Oleh

AGUNG HASINTONGAN PARULIAN HASIBUAN

Kerak magnesium karbonat ($MgCO_3$) yang terbentuk pada sistem perpipaan industri dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas sekaligus merusak peralatan secara permanen. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi suhu pirolisis asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor alami terhadap pembentukan kerak $MgCO_3$. Pengujian dilakukan menggunakan metode *unseeded experiment* dengan tiga variasi suhu pirolisis, yaitu 300 °C, 400 °C, dan 500 °C, pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,003 M; 0,004 M; 0,005 M dan 0,010 M serta konsentrasi inhibitor 5 ppm; 10 ppm; 15 ppm; dan 20 ppm.

Efektivitas penghambatan kerak tertinggi dicapai oleh asap cair hasil pirolisis pada suhu 400 °C, yaitu sebesar 91,80% pada konsentrasi larutan 0,003 M dengan penambahan inhibitor 20 ppm. Urutan efektivitas penghambatan secara keseluruhan menempatkan suhu pirolisis 400 °C sebagai yang terbaik, diikuti oleh 500 °C, dan yang terendah adalah 300 °C. Hasil pengujian kupon logam turut memperkuat temuan tersebut dengan nilai efektivitas mencapai 95,65%, mengonfirmasi potensi asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor kerak yang signifikan.

Analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan perubahan bentuk kerak $MgCO_3$ dari permukaan padat menjadi kristal berukuran lebih kecil dengan variasi bentuk *sphere*, lempengan tipis, dan struktur berpori. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) mengungkapkan penurunan intensitas puncak difraksi yang mengindikasikan terjadinya distorsi pada struktur kerak, dengan fase hidromagnesit tetap menjadi fase dominan. Analisis *Particle Size Analyzer* (PSA) memperlihatkan bahwa ukuran partikel tidak mengalami perubahan signifikan, namun inhibitor terbukti berperan dalam memengaruhi mekanisme pertumbuhan kerak melalui adsorpsi senyawa aktif pada permukaan kerak.

Kata Kunci: Asap Cair, Cangkang Kelapa Sawit, Inhibitor, Kerak, $MgCO_3$,
Pirolisis

ABSTRACT

STUDY ON THE EFFECT OF HEATING TEMPERATURE IN THE PYROLYSIS PROCESS OF LIQUID SMOKE FROM PALM KERNEL SHELL AS AN INHIBITOR OF MAGNESIUM CARBONATE (MgCO_3) SCALE USING THE UNSEEDED EXPERIMENT METHOD

By

AGUNG HASINTONGAN PARULIAN HASIBUAN

The formation of magnesium carbonate (MgCO_3) scale in industrial piping systems can significantly reduce heat transfer efficiency and cause permanent damage to equipment. This study aimed to investigate the effect of pyrolysis temperature variations (300 °C, 400 °C, and 500 °C) of liquid smoke derived from palm kernel shell as a natural MgCO_3 scale inhibitor, employing the unseeded experiment method with growth solution concentrations of 0.003, 0.004, 0.005, and 0.010 M and inhibitor concentrations of 5, 10, 15, and 20 ppm. The highest inhibition efficiency was achieved by liquid smoke pyrolyzed at 400 °C, reaching 91.80% at a growth solution concentration of 0.003 M with 20 ppm inhibitor, followed by 500 °C and 300 °C in descending order of effectiveness, further corroborated by metal coupon testing which yielded an inhibition efficiency of 95.65%. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed a morphological transformation of MgCO_3 crystals from solid surfaces into smaller crystals exhibiting spherical, platelet, and porous structures. X-Ray Diffraction (XRD) analysis demonstrated a reduction in diffraction peak intensity, indicating distortion of the crystal structure while the hydromagnesite phase remained dominant. Particle Size Analyzer (PSA) analysis showed no significant change in particle size; however, the inhibitor was confirmed to influence the crystal growth mechanism through adsorption of active compounds onto the crystal surface.

Keywords: Liquid Smoke, Palm Kernel Shell, Inhibitor, Scale, MgCO_3 , Pyrolysis.

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI INHIBITOR
KERAK MAGNESIUM KARBONAT ($MgCO_3$) MENGGUNAKAN
METODE *UNSEEDED*
*EXPERIMENT***

Oleh

Agung Hasintongan Parulian Hasibuan

Skripsi

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

Pada

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

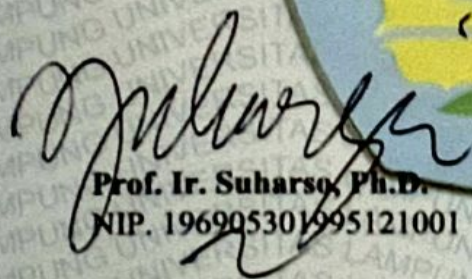


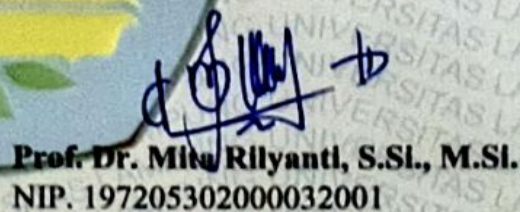
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**Judul : STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN
PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR
DARI CANGKANG KELAPA SAWIT
SEBAGAI INHIBITOR KERAK
MAGNESIUM KARBONAT (MgCO₃)
MENGUNAKAN METODE UNSEEDED
EXPERIMENT**


Nama Mahasiswa : Agung Hasintongan Parulian Hasibuan
Nomor Pokok Mahasiswa : 2217011076
Program Studi : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




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


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

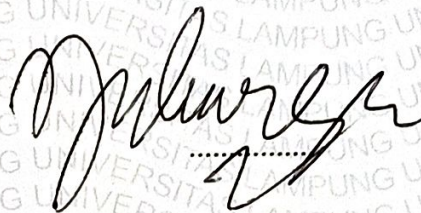
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

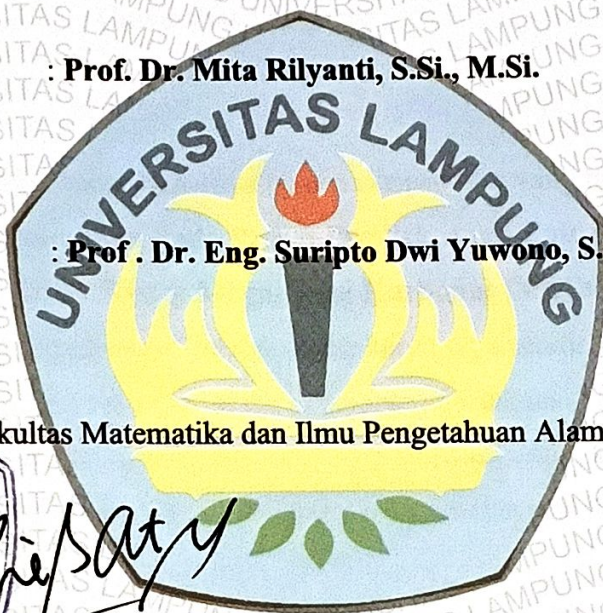
Ketua : **Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D.**



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



Anggota : **Prof. Dr. Eng. Supto Dwi Yuwono, S.Si., M.T.**



Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **05 Juni 2026**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Agung Hasintongan Parulian Hasibuan
NPM : 2217011076
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”** adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

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

Bandar Lampung, 07 Juni 2026
Yang menyatakan,



METERAI
TEMPEL
5D802AOX012545924

Agung Hasintongan Parulian Hasibuan
NPM. 2217011076

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Agung Hasintongan Parulian Hasibuan lahir di Kubu pada tanggal 26 November 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara, putra dari pasangan Bapak Anggiat Hasibuan dan Ibu Krista Sinaga. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDS Yosef Arnoldi Bagan Batu pada tahun 2010-2016. Sekolah Menengah Pertama di SMPS Yosef Arnoldi Bagan Batu pada tahun 2016-2019. Sekolah Menengah Atas di SMAS Yosef Arnoldi Bagan Batu pada tahun 2019-2022. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menempuh studi di Program Studi Kimia FMIPA Universitas Lampung, penulis aktif dalam Persekutuan Oikumene Mahasiswa MIPA menjadi pengurus sie kelompok kecil periode kepengurusan 2023-2024. Selain itu, penulis juga pernah menjadi pengurus Persekutuan Mahasiswa Kristen PERKANTAS Lampung pada tahun 2024-2025. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan pelatihan kewirausahaan dilaksanakan oleh *United Evangelical Mission* dan *GKPA Church* pada tahun 2023. Selain itu, penulis juga pernah mengikuti berbagai kompetisi perlombaan baik tingkat fakultas maupun nasional khususnya di bidang bahasa inggris dan komunikasi pada tahun 2023 serta cerdas cermat sains di bidang fakultas pada tahun 2024. Selain itu penulis juga melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT PLN Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit Power Sebalang dari 23 Desember - 02 Februari 2025. Selanjutnya, pada tahun 2025 penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Kelurahan Labuhan Ratu Raya. Pada tahun 2025, penulis berperan sebagai asisten praktikum mata kuliah Praktikum Kimia Anorganik II dan Praktikum Kimia Dasar, serta Asisten Dosen Mata Kuliah Pendidikan Agama Kristen FMIPA. Penulis menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA

Universitas Lampung dengan judul “Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat (MgCO_3) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”.

MOTTO

Ad Maiorem Dei Gloriam

Demi Kemuliaan Tuhan yang Lebih Besar

Sicut aurum igne purificatur,

ita fides et labor meus in Deo perficiuntur

Seperti emas dimurnikan oleh api, demikian iman dan usahaku
disempurnakan dalam Tuhan

In omni experimento, Deus dux meus et veritas finis meus

Dalam setiap eksperimen, Tuhan adalah penuntunku dan kebenaran adalah
tujuanku

“Sebab di dalam Dialah tersembunyi segala harta hikmat dan pengetahuan.”

— **Kolose 2:3**

“Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku.”

— **Filipi 4:13**

“Langit menceritakan kemuliaan Allah, dan cakrawala memberitakan pekerjaan tangan-Nya.”

— **Mazmur 19:2**

“Kuatkan dan teguhkanlah hatimu, janganlah takut dan jangan gemetar karena mereka, sebab Tuhan, Allahmu, Dialah yang berjalan menyertai engkau; Ia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau. Sebab Tuhan, Dia sendiri akan berjalan di depanmu, Dia sendiri akan menyertai engkau, Dia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau; janganlah takut dan janganlah patah hati.”

— **Ulangan 31:6, 8**

“The more I study science, the more I believe in God.”

— Louis Pasteur (**Bapak Kimia & Mikrobiologi Modern**)

“Science without religion is lame, religion without science is blind.”

— **Albert Einstein**

“The chief aim of all investigations of the external world should be to discover the rational order and harmony which has been imposed on it by God.”

— **Johannes Kepler (Astronom & Matematikawan)**

KEMULIAAN

**Kemuliaan kepada Bapa, dan Putra, dan Roh Kudus,
seperti pada permulaan,
sekarang, selalu,
dan sepanjang segala masa.
Amin**

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah Tritunggal Maha Kudus,
Allah Bapa, Allah Putra Tuhan Yesus Kristus, dan Allah Roh Kudus,
serta dengan segala kerendahan hati,
penulis mempersembahkan skripsi ini kepada:

Kakek & Nenek Tercinta

M. Hasibuan & S. Br. Manalu (Op. Mulyanti)

Bapak & Mama Tercinta

A. Hasibuan & K. Br. Sinaga

Dosen Pembimbing dan Dosen Penguji

Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D. dan Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing, serta Bapak Prof. Dr.Eng Suropto Dwi Yuwono, S.Si., M.T

Dosen-dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

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

Sahabat Penulis

Sahabat-sahabat tercinta yang telah menemani perjalanan ini. Kalian adalah warna terindah dalam perjalanan penulis.

ALMAMATER TERCINTA

UNIVERSITAS LAMPUNG

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

JURUSAN KIMIA

† Soli Deo Gloria †

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Tritunggal Maha Kudus, Allah Bapa, Allah Putra yaitu Tuhan Yesus Kristus, dan Allah Roh Kudus, atas segala berkat, kasih karunia, tuntunan, dan penyertaan-Nya yang begitu luar biasa, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Studi Pengaruh Suhu Pemanasan pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Cangkang Kelapa Sawit sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment***".

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa karya ilmiah ini masih memiliki keterbatasan, baik dari segi penyusunan maupun isi. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan di masa yang akan datang. Selama proses penelitian hingga penulisan skripsi ini, penulis memperoleh banyak dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak yang sangat berarti. Dengan penuh rasa hormat dan syukur, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Tritunggal Maha Kudus, Allah Bapa, Allah Putra Tuhan Yesus Kristus, dan Allah Roh Kudus, atas setiap nafas kehidupan, hikmat, kekuatan, dan kasih setia yang tak pernah berhenti mengalir dalam setiap langkah perjuangan penulis. Setiap halaman skripsi ini adalah bukti nyata campur tangan Tuhan. Segala kemuliaan hanya bagi Tuhan.
2. Orang tua tercinta, Bapak Anggiat Hasibuan dan Ibu Krista Br. Sinaga, yang dengan penuh kasih sayang, kesabaran, pengorbanan, dan doa yang tidak pernah putus telah mendidik dan menyekolahkan penulis hingga sampai pada tahap ini. Terima kasih atas setiap tetes keringat, setiap doa yang terucap di sepertiga malam, dan setiap dukungan yang selalu hadir baik dalam suka maupun duka. Bapak dan Ibu adalah sumber semangat dan alasan terkuat penulis untuk terus berjuang. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai salah satu wujud bakti dan rasa terima kasih yang tulus.

3. Kakek dan Nenek tercinta, M. Hasibuan dan S. Br. Manalu (Op. Mulyanti), yang telah lebih dahulu berpulang ke pangkuan Allah Bapa. Tidak ada kata yang cukup untuk menggambarkan betapa besar jasa dan kasih sayang yang telah mereka berikan kepada penulis. Mereka adalah sosok yang dengan penuh keikhlasan dan ketulusan hati telah membesarkan, mendidik, membimbing, bahkan menyekolahkan penulis hingga penulis bisa berdiri sejauh ini. Di balik setiap langkah yang penulis jejak, ada doa-doa mereka yang telah dipanjatkan jauh sebelum penulis memahami artinya. Ada tangan-tangan mereka yang lelah demi memastikan penulis mendapat yang terbaik. Meski raga mereka kini telah tiada, namun semangat, nilai-nilai hidup, dan kasih sayang yang telah mereka tanamkan akan senantiasa hidup dan menjadi kekuatan terbesar bagi penulis sepanjang hayat. Terima kasih Opung, karena pernah hadir dan menjadi fondasi terkuat dalam hidup penulis. Selamat beristirahat dalam damai sejahtera Allah, di tempat yang jauh lebih indah.
4. Adik tercinta, Kokoh Emma Gracia Hasibuan, yang selalu menghadirkan semangat dan senyuman di setiap hari yang berat. Terima kasih atas kasih sayang, doa, dan dukungan yang tulus. Semoga senantiasa diberikan kesuksesan, kesehatan, dan selalu dalam lindungan Tuhan dalam setiap langkah perjalanan hidupmu.
5. Paktua, Maktua, Bou, Amangboru, Uda dan Nanguda, dan seluruh adik-adik dari keluarga besar Op. Mulyanti Hasibuan/Br. Manalu, yang telah mendukung dan memotivasi penulis, baik secara material maupun moril, selama perjalanan panjang ini. Kehadiran dan kepedulian kalian menjadi penyemangat yang sangat berarti bagi penulis.
6. Keluarga Besar Hasibuan dan Keluarga Besar Sinaga, yang dengan penuh ketulusan telah mendukung, memotivasi, dan membantu penulis dari segi moril maupun materil. Terima kasih atas setiap doa dan dorongan yang diberikan selama ini. Semoga Tuhan membalas semua kebaikan yang telah diberikan.
7. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.

8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
9. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
10. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si., selaku Sekretaris Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
11. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I. Terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala waktu, kesabaran, ilmu, arahan, motivasi, dan kepercayaan yang telah Bapak berikan kepada penulis sejak tahap perencanaan penelitian hingga penyelesaian skripsi ini. Bapak adalah sosok pembimbing yang tidak hanya mencerdaskan secara akademis, tetapi juga membentuk karakter penulis untuk menjadi pribadi yang lebih teliti, tekun, dan bertanggung jawab. Dedikasi Bapak dalam membimbing mahasiswa sungguh menjadi teladan yang luar biasa bagi penulis. Semoga Tuhan senantiasa melimpahkan kesehatan, keberkahan, dan kemudahan dalam setiap langkah Bapak.
12. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II penulis. Terima kasih atas segala saran, masukan, bimbingan yang sangat berharga, serta perhatian yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
13. Bapak Prof. Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, S.Si., M.T. dan Ibu Dr. Dian Herasari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembahas penulis. Terima kasih atas segala kritik, saran, dan masukan yang sangat berharga demi penyempurnaan skripsi ini.
14. Bapak Mulyono, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik penulis. Terima kasih atas arahan, bimbingan, dan dukungan yang diberikan selama penulis menjalani masa perkuliahan.
15. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, serta Mba Liza selaku staff

laboratorium Kimia Anorganik Fisik. Terima kasih atas ilmu yang telah diberikan mendidik penulis untuk menjadi lebih disiplin dan cermat. Semua itu kini penulis sadari sebagai bentuk kepedulian dan kasih sayang yang tulus.

16. Teman-teman Kimia Angkatan 2022 dan khususnya teman-teman Kelas B Kimia 2022. Terima kasih atas kebersamaan, tawa, dan semangat yang selalu diberikan selama masa perkuliahan.
17. Teman-teman POM MIPA Unila, Teman-teman PMK Perkantas Lampung, Terima kasih atas kebersamaan dan kekeluargaan yang telah terjalin selama ini.
18. Sahabat-sahabat terkasih: Febe Sembiring, Arron, Nathania, Juansen, Angelika Fika, Bang Baskoro, Bang Bagas, Aylin, Faren, Meilina, dan Tiara Cahya Mukti. Terima kasih telah menemani penulis dalam suka dan duka, menjadi tempat bercerita, dan selalu hadir dengan semangat yang tulus. Kalian adalah warna terindah dalam perjalanan ini.
19. Suharso Research Team 2022: Tegar, Khansa, Yenaly, Widia, Bunga, dan Kadek. Terima kasih atas kerja sama, kebersamaan, dan segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama penelitian berlangsung. Semangat yang selalu saling dibagikan menjadi bagian penting dari perjalanan skripsi ini.
20. Teman sepenelitian dan seperjuangan, Kadek Wendi Septiani. Terima kasih telah menemani penulis, bersedia diajak berjuang bersama, dan saling menguatkan dalam setiap proses yang tidak selalu mudah. Terima kasih sudah mau melangkah maju bersama penulis.
21. Terima kasih juga kepada mantan penulis, yang tanpa disadari telah menjadi salah satu motivasi tersendiri bagi penulis untuk terus bangkit, membuktikan diri, dan menyelesaikan skripsi ini. Semoga selalu sehat dan bahagia, ya, Tan.
22. Terima kasih untuk diri sendiri. Untuk Agung yang berjuang sendirian, yang belajar di malam hari ketika yang lain sudah tidur, yang menangis dalam diam tapi esoknya bangkit lagi, yang tetap memilih untuk bertahan meskipun lelah sudah memuncak. Tidak ada yang sempurna, tapi Agung sudah memberikan

yang terbaik yang Agung bisa. Selamat, Agung telah berhasil melewatinya. Agung pantas untuk bangga.

23. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini dari awal hingga akhir penyelesaiannya. Setiap bantuan, doa, dan dukungan yang diberikan sungguh sangat berarti bagi penulis.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan bagi semua pihak yang membacanya. Semoga Tuhan Yang Maha Kasih senantiasa memberkati dan melindungi kita semua

Bandar Lampung, Juni 2026

Penulis

Agung Hasintongan P H
NPM. 2217011076

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik pada Peralatan Industri	6
2.2. Kerak	7
2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak.....	8
2.4. Magnesium Karbonat ($MgCO_3$)	13
2.5. Metode Pencegahan Kerak $MgCO_3$	15
2.5.1. Pengendalian pH	15
2.5.2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air	16
2.5.3. Penggunaan Inhibitor Kerak.....	16
2.6. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	19
2.6.1. Pirolisis Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit.....	19
2.7. Metode Unseeded Experiment	26
2.8. Analisis dan Karakterisasi Kerak $MgCO_3$	26
2.8.1. Spektrofotometer InfraRed (IR)	27
2.8.2. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	30
2.8.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	31
2.8.4. Difraksi Sinar-X (X-RD).....	33
2.8.5. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	34
III. METODE PENELITIAN	36
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	36
3.2. Alat dan Bahan	36
3.3. Prosedur Penelitian.....	37
3.3.1. Pembuatan Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	37
3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	37

3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal Magnesium Karbonat ($MgCO_3$)	38
3.4. Analisis Data	41
3.5. Diagram Alir	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	44
4.1.1. Uji Stabilitas Larutan Inhibitor	47
4.1.2. Pengukuran pH Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	48
4.2. Analisis Komponen Senyawa Kimia Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan Spektrofotometer Inframerah.....	49
4.3. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i>	55
4.3.1. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 300 °C Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i>	55
4.3.2. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 400 °C Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i>	58
4.3.3. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 500 °C Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometer</i>	61
4.4. Penentuan Pertumbuhan Kerak $MgCO_3$ Tanpa Penambahan Inhibitor Menggunakan Metode Unseeded Experiment	66
4.5. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $MgCO_3$ Dengan Penambahan Inhibitor Menggunakan Metode Unseeded Experiment	68
4.5.1. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $MgCO_3$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 300 °C	68
4.5.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $MgCO_3$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis pada suhu 400 °C	72
4.5.3. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $MgCO_3$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 500 °C	77
4.5.4. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu 300, 400, dan 500 °C	82
4.6. Analisis Efektivitas Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Pembentukan Kerak $MgCO_3$ Pada Kupon Logam	87
4.6.1. Kupon Logam pada Larutan Pertumbuhan Kerak $MgCO_3$ 0,003 M dengan Penambahan Inhibitor 20 ppm pada Variasi Suhu Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300, 400, dan 500 °C	88
4.6.2. Kupon Logam pada Larutan Pertumbuhan Kerak $MgCO_3$ 0,010 M dengan Penambahan Inhibitor pada Variasi Suhu Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300, 400, dan 500 °C	89
4.7. Analisis Kerak Magnesium Karbonat	91
4.8. Mekanisme Penghambatan Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) ..	93

4.9. Analisis Permukaan Kerak Magneisum Karbonat (MgCO_3) Menggunakan <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	95
4.10. Analisis Struktur Kerak Magnesium Karbonat (MgCO_3) Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	98
4.11. Analisis Distribusi Partikel Kerak Magnesium Karbonat (MgCO_3) Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i>	103
4.12. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Asap Cair	107
V. SIMPULAN DAN SARAN	112
5.1. Simpulan.....	112
5.2. Saran.....	113
DAFTAR PUSTAKA	114
LAMPIRAN	121

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Representasi skematik proses pertukaran panas	7
2. Nukleasi homogen	10
3. Nukleasi heterogen	10
4. Kelarutan $MgCO_3$	14
5. Kerak magnesium karbonat pada pipa industri	15
6. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kerak.....	18
7. Alat Pirolisis.....	21
8. Cangkang kelapa sawit	22
9. Spektrum FTIR Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit.....	28
10. Skema GC-MS	31
11. Analisis SEM $MgCO_3$	33
12. Analisis XRD $MgCO_3$	34
13. Analisis PSA $MgCO_3$	35
14. Diagram alir penelitian.....	42
15. Pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit.....	44
16. Uji larutan asap cair cangkang kelapa sawit	47
17. Hasil analisis FTIR pada asap cair cangkang kelapa sawit	50
18. Kromatogram asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 300 °C... 55	
19. Kromatogram asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 400 °C.... 58	
20. Kromatogram asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 500 °C.... 62	
21. Grafik pertumbuhan kerak $MgCO_3$ tanpa penambahan inhibitor	67

22. Diagram Efektivitas Penghambatan Kerak MgCO_3 dengan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu $300\text{ }^\circ\text{C}$	69
23. Diagram Efektivitas Penghambatan Kerak MgCO_3 dengan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$	73
24. Diagram Efektivitas Penghambatan Kerak MgCO_3 dengan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu $500\text{ }^\circ\text{C}$	78
25. Perbandingan Permukaan Kupon Logam Konsentrasi Larutan $0,003\text{ M}$	88
26. Perbandingan Permukaan Kupon Logam Konsentrasi Larutan $0,010\text{ M}$	90
27. Perbedaan larutan pertumbuhan MgCO_3 $0,003\text{ M}$	91
28. Perbandingan kerak MgCO_3 $0,003\text{ M}$	92
29. Mekanisme inhibitor menghambat laju pertumbuhan kristal.....	95
30. Morfologi kerak MgCO_3 pada konsentrasi $0,005\text{ M}$	96
31. Grafik XRD kristal MgCO_3 pada larutan pertumbuhan $0,010\text{ M}$	99
32. Hasil Analisis PSA Kerak MgCO_3	104

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komponen kimia asap cair cangkang sawit	25
2. Gugus Fungsional Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit.....	30
3. Rata-rata hasil dan rendemen pirolisis cangkang kelapa sawit	45
4. pH Asap Cair Cangkang kelapa Sawit	49
5. Gugus Fungsi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pirolisis 300 °C	51
6. Gugus Fungsi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pirolisis 400 °C	51
7. Gugus Fungsi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Pirolisis 500°C	52
8. Perbandingan Gugus Fungsi Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit	53
9. Komponen kimia asap cair cangkang kelapa sawit suhu 300 °C.....	56
10. Komponen kimia asap cair cangkang kelapa sawit suhu 400 °C.....	59
11. Komponen kimia asap cair cangkang kelapa sawit suhu 500 °C.....	63
12. Perbandingan Komposisi Senyawa, Gugus Fungsi, dan Potensi Peran Senyawa sebagai Inhibitor Kerak MgCO ₃ Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Suhu 300, 400, dan 500 °C	65
13. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 300 °C pada variasi larutan pertumbuhan MgCO ₃	71
14. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 400 °C pada variasi larutan pertumbuhan MgCO ₃	75
15. Persentase efektivitas inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis suhu 500 °C pada variasi larutan pertumbuhan MgCO ₃	80
16. Perbandingan Persentasi Efektivitas Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit pada Variasi Suhu Pirolisis	82
17. pH Larutan Pertumbuhan Magnesium Karbonat (MgCO ₃)	86
18. Puncak XRD MgCO ₃	101
19. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Kerak MgCO ₃	108

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri minyak dan gas bumi memiliki peran penting dalam pembangunan nasional. Sektor ini berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi serta menyediakan bahan baku bagi berbagai industri di dalam negeri di berbagai bidang produksi. Kontribusi terhadap pendapatan negara melalui devisa dari ekspor pada sektor industri minyak dan gas bumi juga menjadi salah satu aspek penting bagi pengelolaan ekonomi negara. Pengelolaan sektor ini juga perlu dilakukan secara optimal untuk memanfaatkan potensi yang ada demi kesejahteraan masyarakat dan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Salah satu produk yang dihasilkan melalui sektor industri minyak dan gas bumi ini yakni penyediaan bahan bakar minyak (BBM) dalam mendukung kelancaran transportasi, kegiatan industri, serta berbagai aktivitas lain yang sangat bergantung pada ketersediaan energi. Sehingga, permintaan energi yang terus meningkat seiring dengan tumbuhnya aktivitas industri dan mobilitas masyarakat dapat menunjukkan bahwa peran sektor ini tidak akan tergantikan (Widyastuti dan Nugroho, 2020).

Salah satu komponen yang sangat penting dalam kegiatan produksi pada industri minyak dan gas bumi adalah pipa penyalur (*pipeline*). Pipa berfungsi sebagai elemen konstruksi berbagai keperluan, terutama dalam sektor minyak dan gas, air minum, serta industri kimia lainnya. Jaringan pipa merupakan infrastruktur utama yang memiliki peran penting dalam sistem distribusi minyak dan gas bumi. Pipa-

pipa tersebut, digunakan sebagai media transportasi fluida dalam skala besar, dan dapat berperan lebih efisien serta ekonomis jika dibandingkan dengan transportasi lainnya seperti truk, kereta api, maupun kapal laut. Sehingga, sangat mendukung kelancaran operasional industri dari produksi awal sampai menghasilkan produk berupa minyak dan gas bumi yang siap dipasarkan (Fatra dan Suwignyo, 2020).

Salah satu permasalahan yang terjadi pada bagian pipa-pipa penyaluran di berbagai industri minyak dan gas bumi adalah terbentuknya kerak yang mengeluarkan biaya tinggi untuk pengendalian serta perbaikan dari pipa-pipa penyalur. Kerak merupakan lapisan padat yang kemudian terbentuk dari senyawa-senyawa anorganik serta ditemukan dalam permukaan sistem perpindahan panas. Pada proses pembentukan kerak, dimulai oleh pengendapan partikel mineral yang terdapat dalam air. Proses pengerakan ini kemudian menjadi fenomena alami yang muncul akibat reaksi kimia antara zat-zat tertentu di dalam air, dan keberadaannya tidak diinginkan. Unsur-unsur seperti kalsium, alkalin, klorida, maupun sulfat mengakibatkan terjadinya pengendapan ketika konsentrasinya melebihi batas kelarutan pada kondisi setimbang.

Dalam kondisi tersebut, partikel-partikel mengendap dan menempel, lalu menetap pada permukaan pipa, hingga membentuk lapisan kerak yang bersifat keras dan sulit dihilangkan. Pertumbuhan kerak pada dasarnya terjadi melalui mekanisme pengkristalan, yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Hal ini terjadi seperti kondisi larutan yang lewat jenuh, laju aliran fluida, temperatur operasi, adanya zat pengotor (*impurities*) dan penggunaan zat aditif tertentu (Dera, 2018). Sehingga, beberapa pendekatan juga telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini, seperti pengaturan pH dari larutan yang digunakan, proses pelunakan air, serta penghilangan kandungan mineral dari air.

Salah satu metode yang umum dilakukan adalah dengan pengasaman oleh larutan asam berkonsentrasi tinggi. Namun, penggunaan asam dalam kadar tinggi ini juga memiliki dampak, dikarenakan dapat mempercepat terjadinya proses korosi pada sistem perpipaan, dan dianggap kurang efisien dan berisiko tinggi (Raharjo,

2020). Sementara itu, metode pelunakan dan proses demineralisasi air juga memerlukan biaya operasional yang tinggi, dikarenakan pentingnya penyediaan air yang bebas dari kandungan mineral. Dengan adanya hambatan-hambatan tersebut, maka dilakukan pengembangan alternatif yang ekonomis dan aman, yaitu dengan menggunakan inhibitor sehingga mampu dalam mencegah pembentukan kerak dan pertumbuhan kerak yang tidak terkendali pada pipa-pipa penyaluran di industri.

Inhibitor merupakan senyawa kimia yang memiliki kemampuan untuk memperlambat laju reaksi kimia tertentu, walaupun hanya ditambahkan dalam jumlah dan konsentrasi yang kecil pada sistem tertentu. Inhibitor kerak dikenal sebagai suatu senyawa yang dapat mengendalikan berbagai proses kimia sehingga dapat mengurangi pembentukan dan pertumbuhan kerak dalam berbagai peralatan industri, khususnya pada permukaan pipa. Menurut Raharjo (2020), adapun jenis dari inhibitor yang sering digunakan guna mencegah masalah kerak, khususnya dalam sektor industri adalah inhibitor anorganik, seperti asam klorida (HCl), asam sulfat (H₂SO₄), asam asetat (CH₃COOH), maupun penggabungan antara asam klorida (HCl) dan tembaga sulfat (CuSO₄). Seiring dengan perkembangan teknologi dan kemajuan riset inovasi yang mulai dikembangkan, bahan-bahan maupun senyawa yang bersifat ramah lingkungan seperti biomassa yang berasal dari limbah kelapa sawit disebut sebagai asap cair dan digunakan sebagai inhibitor kerak dan dikembangkan guna mendukung keberlanjutan sumber daya alam dan bersifat ekonomis (Suharso *et al.*, 2019).

Pembuatan asap cair dari cangkang kelapa sawit dilakukan dengan menggunakan metode pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal bahan organik pada kondisi minim oksigen atau bahkan tanpa oksigen sama sekali. Pada proses ini, bahan baku mengalami perubahan struktur kimia menjadi gas yang kemudian didinginkan dan dikondensasikan hingga berbentuk cairan. Perangkat pirolisis biasanya terdiri atas ruang pembakaran, penangkap tar, dan tabung kondensasi, serta dilengkapi blower dan pendingin untuk meningkatkan efisiensi proses dengan mempercepat aliran dan kondensasi asap cair.

Hasil pirolisis sangat dipengaruhi oleh variasi suhu yang digunakan, karena setiap komponen utama penyusun biomassa, seperti hemiselulosa, selulosa, dan lignin, memiliki rentang suhu dekomposisi yang berbeda. Hemiselulosa umumnya terurai pada suhu 220–400 °C, selulosa pada 320–420 °C, sedangkan lignin baru terurai pada suhu di atas 400 °C. Pada suhu sekitar 400 °C, asap cair dari cangkang kelapa sawit cenderung kaya akan senyawa karbonil, asam asetat, fenol, dan berbagai turunan asam organik lain yang berkontribusi pada sifat fungsionalnya (Lestari dkk., 2025). Dengan adanya teknologi pirolisis, limbah cangkang kelapa sawit tersebut akan dikonversi menjadi asap cair dengan berbagai senyawa aktif dan memiliki kegunaan dalam menghambat pembentukan kerak, khususnya kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$).

Dalam penelitian ini, proses pembentukan kerak Magnesium Karbonat kemudian dikaji menggunakan pendekatan *unseeded experiment*, yaitu suatu metode pendekatan penumbuhan Kristal atau kerak tanpa melibatkan proses nukleasi awal. Untuk mengevaluasi dan mengetahui karakteristik dari komponen senyawa aktif dalam asap cair yang digunakan, maka dilakukan analisis gugus fungsi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR), sedangkan guna mengetahui kandungan senyawa kimianya maka diidentifikasi dengan teknik *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Sementara, dalam menentukan struktur dari morfologi kerak yang terbentuk maka dilakukan pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) serta, polanya kemudian ditelaah dan dilamati dengan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD). Selain itu, untuk distribusi ukuran partikel kerak yang terbentuk juga dilakukan analisis lebih lanjut dalam penelitian ini menggunakan instrumen *Particle Size Analyzer* (PSA).

1.2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis keefektifan asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis sebagai inhibitor kerak magnesium karbonat (MgCO_3) menggunakan metode *unseeded experiment* melalui analisis data, serta karakterisasi menggunakan spektrofotometer IR, GC-MS, SEM, PSA dan XRD.
2. Mengkaji perbedaan pertumbuhan kerak magnesium karbonat (MgCO_3) pada konsentrasi larutan pertumbuhan dan konsentrasi inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit dengan variasi suhu pirolisis.

1.3. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kemampuan dari inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit yang divariasikan dalam berbagai suhu sebagai inhibitor kerak MgCO_3 sehingga dapat dikembangkan untuk memperoleh inhibitor kerak yang lebih efektif, terutama untuk mencegah pembentukan kerak pada peralatan-peralatan industri agar dampak negatif dari pembentukan kerak tersebut dapat dikurangi.

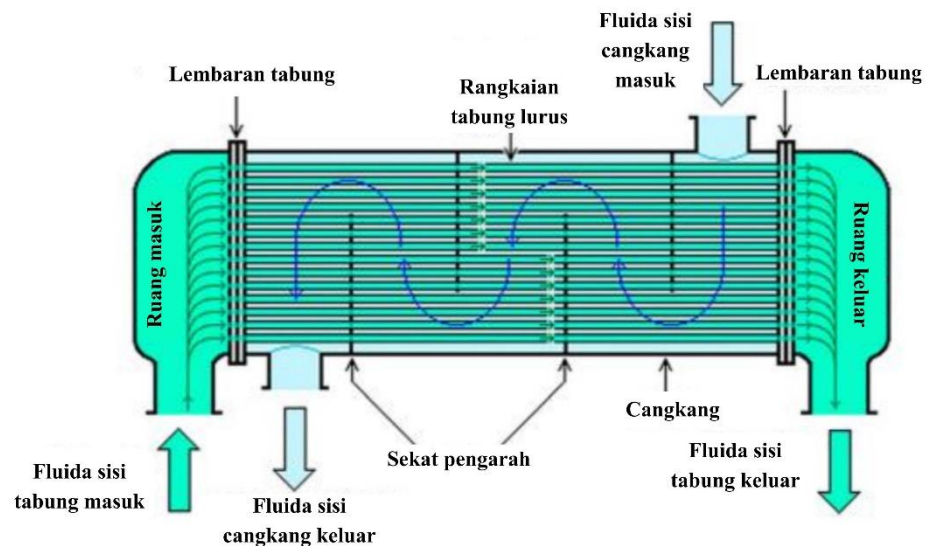
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik pada Peralatan Industri

Endapan adalah bentuk kristal yang bertekstur keras dan dapat ditemukan pada proses perpindahan panas dengan pengeboran (*drilling*). Endapan-endapan ini akan menempel pada permukaan instrumen pemindah panas. Endapan-endapan tersebut adalah senyawa anorganik, yang didalamnya terdapat mineral. Sehingga, pengendapan tersebut disebut sebagai pengendapan mineral, yang terjadi ketika konsentrasi larutan terdapat ion yang tinggi, dan nilai kelarutan ion yang sudah mencapai batas maksimum akan berpengaruh terhadap senyawa yang tidak lagi larut (terlarut), namun terpisah dari pelarutnya, khususnya dalam bentuk padat dan akan mengalami pengendapan. Endapan yang banyak ditemukan pada industri minyak, diantaranya ialah magnesium karbonat ($MgCO_3$), kalsium karbonat ($CaCO_3$), kalsium sulfat ataupun dalam bentuk gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), dan kalsium sulfat dalam bentuk anhidrat ($CaSO_4$), maupun barium sulfat ($BaSO_4$). Dalam pengendapan tersebut, terjadi reaksi kimia yang menyebabkan adanya jumlah zat terlarut yang kemudian mengalami perubahan suhu serta penurunan tekanan, kemudian berpengaruh terhadap terganggunya keseimbangan dalam aliran air dan akan menyebabkan pembentukan endapan kristal (Sari, 2011).

Umumnya, air berfungsi sebagai media pendingin untuk menyingkirkan panas yang tidak diinginkan dari permukaan perpindahan panas, yang meliputi alat penukar panas, kondensor, evaporator, menara pendingin, dan dinding pipa. Dalam proses ini, air dipompa melewati tabung penukar panas yang terpapar panas. Air yang dipanaskan kemudian didinginkan di menara pendingin melalui penguapan, sehingga dapat digunakan kembali untuk proses pendinginan. Pipa-

pipa tersebut, akan mengalami pengurangan volume dari aliran fluida saat terjadi peningkatan kekasaran dalam bagian pipa, secara berulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 yang memperlihatkan skematik dari proses pertukaran panas mineral-mineral terlarut seperti karbonat, sulfat, fosfat, silikat, dan besi dapat berkontribusi pada pembentukan endapan dan kerak. Pembentukan kerak ini dapat terjadi dalam kondisi supersaturasi, terutama akibat fluktuasi suhu mendadak di permukaan perpindahan panas saat air bersentuhan dengan area tersebut.



Gambar 1. Representasi skematik proses pertukaran panas (Wang *et al.*, 2019).

2.2. Kerak

Menurut Susilowati dkk. (2024), kerak merupakan akumulasi mineral yang disebabkan oleh peningkatan suhu, dan menjadikannya sebagai lapisan yang sukar dihilangkan, yang berdampak akan menurunnya kapasitas aliran pada pipa atau peralatan industri lainnya. Kerak yang terbentuk disebabkan oleh penyempitan diameter pipa yang mengalirkan fluida pada suatu sistem tertentu. Pembentukan

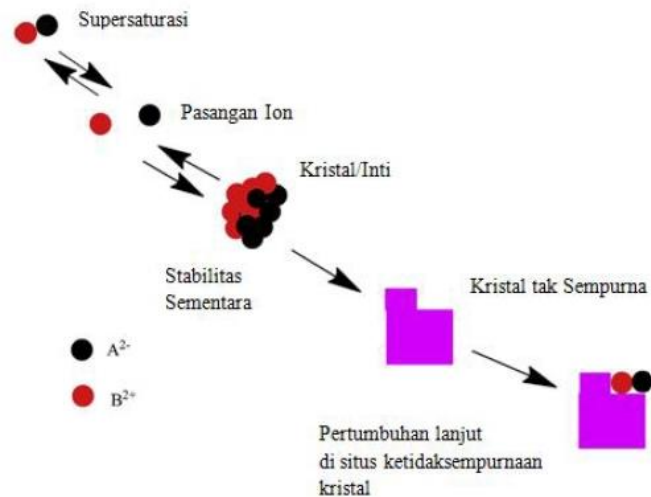
kerak berkaitan dengan endapan-endapan lapisan oksida yang berasal dari senyawa anorganik maupun senyawa organik pada pipa-pipa dalam industri dikarenakan pengkristalan ion mineral dalam air. Proses pembentukan kerak ini disebut dengan kristalisasi. Adapun faktor yang mempengaruhi pembentukan kerak dan pertumbuhan kristal meliputi supersaturasi, suhu, tekanan, kekuatan ion, evaporasi, durasi kontak, dan pH. Sementara Sudarmaji dan Hadi (2021), mendefinisikan kerak sebagai hasil endapan yang terbentuk dari pengendapan senyawa anorganik yang mengkristal dan menumpuk pada permukaan-permukaan mineral. Kristal-kristal tersebut kemudian memiliki muatan ion yang lebih rendah dan cenderung berkumpul, sehingga menghasilkan lapisan kerak dalam sistem fluida di industri. Kerak yang dihasilkan kemudian muncul diakibatkan oleh pengendapan yang mengeras lalu melekat pada permukaan pipa-pipa. Selain itu, faktor pemicu pembentukan kerak meliputi magnesium (Mg) dan besi (Fe) dalam bentuk karbonat, serta kalsium (Ca) dalam bentuk sulfat. Kerak dapat terbentuk jika pada peralatan yang bersentuhan dengan air, termasuk pipa produksi, pipa selubung, pipa alir, dan peralatan produksi yang ada di permukaan. Pipa-pipa tersebut, akan mengalami pengurangan volume dari aliran fluida saat terjadi peningkatan kekasaran dalam bagian pipa (Suharso dan Buhani, 2015)

2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak

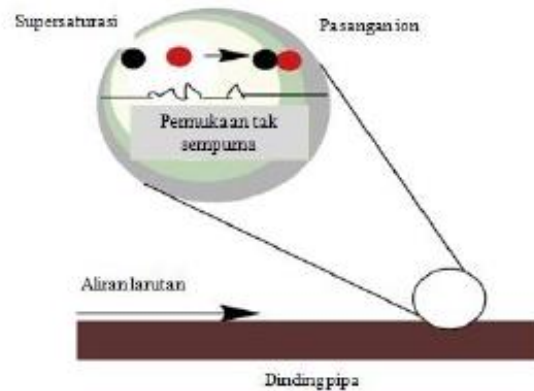
Terbentuknya kerak maupun endapan yang terdapat dalam sistem produksi berhubungan terhadap komposisi air formasi dengan ion terlarut. Umumnya, air formasi tersebut dapat membawa berbagai jenis ion terlarut dan mengandung kation misal Na, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , serta Fe^{3+} . Bukan hanya kation, namun anion-anion juga dimiliki oleh ion-ion dalam air formasi yaitu Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , dan CO_3^{2-} . Pada saat ion-ion tersebut mengalami pencampuran (*mixing*) di dalam air, maka ion-ion tersebut dapat bereaksi dengan terbentuknya senyawa dalam air yang larut, yang memiliki tingkat kelarutannya masing-masing. Adapun kelarutan memiliki pengertian yaitu seberapa banyaknya suatu zat dapat larut pada suatu pelarut tertentu dalam kondisi fisik tertentu, misal tekanan ataupun suhu.

Proses pembentukan kerak dalam sistem fluida pada umumnya berlangsung melalui tiga tahapan penting, yaitu pembentukan inti (nukleasi), pertumbuhan inti, dan pengendapan. Tahap nukleasi ditandai dengan terjadinya reaksi kimia antara ion-ion terlarut yang mengakibatkan terbentuknya inti kristal berukuran sangat kecil. Pada fase ini, inti kristal bersifat halus dan berukuran submikron sehingga tidak memiliki kecenderungan untuk mengendap akibat masih terdistribusi stabil dalam aliran fluida. Tahap berikutnya adalah pertumbuhan inti, yang berlangsung melalui mekanisme penangkapan molekul atau ion dari medium sekitarnya. Inti kristal yang semula berdiameter sekitar 0,001–0,1 μm (fase koloid) secara progresif mengalami peningkatan ukuran hingga mencapai 0,1–10 μm (fase kristal halus). Pertumbuhan berlanjut sampai kristal mencapai ukuran lebih besar dari 10 μm , pada kondisi ini kristal dikategorikan sebagai kristal kasar yang secara fisik mulai memiliki kecenderungan untuk mengalami sedimentasi. Tahap akhir berupa pengendapan yang dipengaruhi oleh interaksi antara sifat fisik kristal dan dinamika fluida pembawa.

Peningkatan ukuran dan massa jenis kristal menghasilkan percepatan laju sedimentasi, yang pada akhirnya dapat mengungguli kecepatan aliran fluida. Apabila kecepatan pengendapan kristal melampaui kecepatan aliran sistem, maka proses deposisi akan terjadi. Dengan demikian, laju kristalisasi, karakteristik pertumbuhan kristal, serta kondisi hidrodinamika fluida secara keseluruhan menjadi faktor penentu utama dalam mekanisme pembentukan dan pengendapan kristal (Aditya, 2019). Tahap awal dalam pembentukan kerak mineral adalah pembentukan gugus atom yang tidak stabil dalam larutan jenuh dengan nukleasi homogen dan nukleasi heterogen seperti yang terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Nukleasi homogen (Crabtree *et al.*, 1999).



Gambar 3. Nukleasi heterogen (Crabtree *et al.*, 1999).

Menurut Suharso dan Buhani (2015), pembentukan kerak pada sistem perpipaan dan peralatan industri juga dapat terjadi apabila terpapar dengan air garam dimulai saat dua jenis air garam yang kemudian memiliki komposisi ionik yang berbeda dilakukan penggabungan (*mixing*). Salah satu contohnya ialah, air formasi yang memiliki ion kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), barium (Ba^{2+}), dan stronsium (Sr^{2+}), saat mengalami pencampuran dengan air laut yang memiliki komposisi ion-ion sulfat, khususnya dalam skala yang besar, dapat menyebabkan terjadinya reaksi dengan menghasilkan senyawa dengan insolubilitas yang tinggi, misal $CaSO_4$, $BaSO_4$, dan $SrSO_4$, yang akan membentuk kerak dengan jenis sulfat. Lalu, jika air garam menguap, mengakibatkan konsentrasi air garam terlarut akan

meningkat dengan melebihi batas maksimum kelarutannya, dan akhirnya akan menyebabkan pengendapan kristal garam. Adapun bentuk dan ukuran kristal yang dihasilkan dari proses pengendapan sangat ditentukan oleh dua hal utama, yaitu seberapa cepat inti kristal terbentuk (laju nukleasi) dan seberapa cepat inti tersebut berkembang menjadi kristal yang lebih besar (laju pertumbuhan). Apabila laju nukleasi tinggi, maka akan dihasilkan banyak kristal namun dengan ukuran yang cenderung kecil. Sementara itu, laju pertumbuhan kristal berperan dalam menentukan besarnya kristal setelah inti terbentuk; makin tinggi laju pertumbuhannya, makin besar pula ukuran akhir kristal. Kedua proses ini baik pembentukan inti maupun pertumbuhan Kristal sangat dipengaruhi oleh tingkat lewat jenuh larutan. Fachry dkk. (2008) juga menegaskan bahwa kecepatan nukleasi dan laju pertumbuhan merupakan faktor paling dominan dalam menentukan ukuran kristal. Beberapa faktor yang mempengaruhi proses kristalisasi dan pembentukan kristal antara lain:

a. Proses Kristalisasi

Kristalisasi dapat didefinisikan sebagai peristiwa terbentuknya partikel padat dari suatu fase yang seragam. Peristiwa ini bisa terjadi dalam berbagai bentuk, misalnya pembentukan partikel padat dari fase uap (contohnya pembentukan butiran salju), pembekuan lelehan cair menjadi kristal tunggal atau polikristal, serta kristalisasi dari larutan cair (Nagy and Braatz, 2012). Khusus untuk kristalisasi dari larutan, proses ini terjadi ketika konsentrasi zat terlarut sudah melebihi batas kelarutannya (kondisi lewat jenuh), sehingga sistem berusaha mencapai keseimbangan dengan cara membentuk kristal dari zat terlarut tersebut. Salah satu contoh kristalisasi yang sering dijumpai adalah pembentukan kerak pada permukaan alat penukar panas, di mana prosesnya berlangsung langsung di permukaan padat (Mandela, 2017).

b. Derajat Kelewatjenuhan

Larutan lewat jenuh (*supersaturated solution*) adalah larutan yang berada dalam keadaan metastabil, di mana kandungan zat terlarutnya lebih banyak dibandingkan larutan jenuh biasa. Dalam keadaan ini, gangguan ringan seperti perubahan suhu

atau guncangan mekanis dapat dengan mudah memicu proses kristalisasi. Kondisi supersaturasi biasanya tercipta ketika zat terlarut ditambahkan ke dalam pelarut pada pH dan suhu tertentu sehingga konsentrasinya melampaui batas kelarutan, yang pada akhirnya menyebabkan terbentuknya kristal. Whitten dkk. (2014) membedakan tingkat kelarutan suatu larutan ke dalam tiga wilayah, yakni daerah stabil, daerah metastabil, dan daerah labil. Menurut Gotama dan Mahfud (2015), tercapainya kondisi lewat jenuh merupakan salah satu kunci keberhasilan proses kristalisasi. Pasalnya, pada kondisi ini larutan mengandung zat terlarut lebih banyak daripada yang seharusnya dapat larut pada suhu tertentu, sehingga mendorong terbentuknya inti kristal (*nucleation*). Selanjutnya, inti-inti tersebut akan tumbuh menjadi kristal berukuran lebih besar melalui mekanisme pertumbuhan kristal (*crystal growth*).

c. Kelarutan Endapan

Apabila jumlah zat terlarut melebihi batas kelarutannya, maka kelebihan zat tersebut akan memisah dari larutan dan membentuk fase padat atau endapan. Nilai kelarutan suatu zat sama dengan konsentrasi molar larutan jenuhnya. Besarnya nilai ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, tekanan, komposisi pelarut, konsentrasi ion-ion lain, serta keberadaan zat terlarut lainnya. Dalam kimia analitik, hasil kali kelarutan (*solubility product constant* atau K_{sp}) digunakan untuk menyatakan keadaan setimbang antara fase padat dan fase larutan pada senyawa yang sukar larut. Meskipun K_{sp} tidak memberikan informasi tentang kecepatan tercapainya kesetimbangan, nilai ini tetap penting untuk menjelaskan kondisi kesetimbangan sekaligus memprediksi apakah suatu reaksi pengendapan akan terjadi atau tidak (Valiakhmetova *et al.*, 2017).

d. Pengaruh Suhu terhadap Kelarutan dan Pembentukan Endapan

Pada suhu yang relatif konstan seperti suhu ruangan, perubahan suhu tidak terlalu berpengaruh terhadap proses pembentukan kerak. Namun, dalam lingkungan industri yang suhunya sering berfluktuasi, perubahan suhu dapat berdampak besar terhadap pembentukan kerak. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa kelarutan sejumlah senyawa anorganik cenderung menurun seiring dengan naiknya suhu.

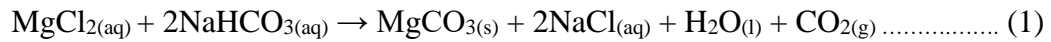
Akibatnya, pada suhu tinggi, ion-ion yang terlarut lebih mudah mengendap dan membentuk kerak. Berdasarkan penelitian Rahmadyo dkk. (2017), laju pembentukan kerak mulai meningkat pada suhu air sekitar 50 °C, dan proses ini berlangsung sangat intensif pada suhu di atas 60 °C. Dari sisi kimia, peningkatan suhu memberikan tambahan energi kinetik kepada molekul-molekul reaktan, sehingga frekuensi tumbukan antar partikel menjadi lebih tinggi. Kondisi ini pada akhirnya mempercepat laju reaksi dan mendorong terbentuknya lebih banyak kristal padat sebagai produk pengendapan.

2.4. Magnesium Karbonat (MgCO₃)

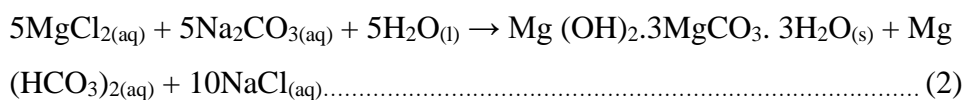
Magnesium karbonat (MgCO₃) merupakan mineral yang memiliki kelarutan rendah dalam air dan air tanah. Mineral ini dapat terbentuk dalam beberapa aplikasi industri, seperti pada evaporator dan pembangkit listrik, dan pendingin. Keberadaan magnesium karbonat ini dapat menimbulkan masalah serius karena dapat mengendap dan menyumbat pipa. Sesuai yang diuraikan oleh Raharjo (2020), terjadinya pembentukan kerak magnesium karbonat dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya konsentrasi larutan, pH, temperatur, tekanan, maupun kekuatan ion. Pada dasarnya, magnesium karbonat dapat dilakukan pengendapan dengan air garam melalui sistem pemanasan, yang menghasilkan tiga bentuk polimorf yang dihasilkan, yaitu kalsit, valerit, dan aragonite. Dari tiga polimorf yang dihasilkan, aragonit dan valerit adalah fase yang stabil dalam suhu yang rendah. Sedangkan, kalsit dapat terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi. Kadar pembentukan kerak magnesium karbonat juga bergantung pada laju aliran.

Dalam mengatasi serta mencegah terjadinya pembentukan kerak magnesium karbonat (MgCO₃) adalah dengan menerapkan inhibitor kimia. Inhibitor ini berfungsi untuk mengendalikan pertumbuhan kristal serta mampu mengubah morfologi kristal tersebut. Adanya inhibitor juga mampu dalam mengontrol proses pembentukan inti dan proses pertumbuhan kristal, khususnya pada permukaan kristal yang berkembang. Selain itu, menggunakan zat aditif juga dapat

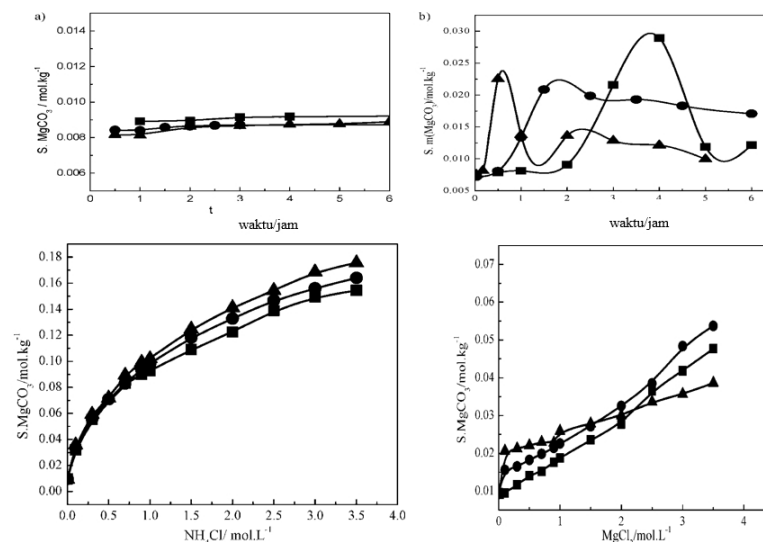
menghambat proses nukleasi dan polimorfisme kristal. Di laboratorium, magnesium karbonat dapat dibentuk melalui reaksi antara garam magnesium terlarut dan natrium bikarbonat. Reaksi pembentukan garam magnesium terlarut dan natrium bikarbonat dapat dilihat pada Persamaan 1 (Aprian, 2022).



Ketika magnesium klorida (MgCl_2) kemudian direaksikan dengan natrium karbonat (Na_2CO_3) pada medium berair, maka akan terbentuk endapan yang terdiri dari magnesium karbonat hidrat kompleks dan magnesium hidroksida. Endapan yang terbentuk ini merupakan hasil interaksi ion Mg^{2+} dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) juga ion hidroksida (OH^-), yang akan menghasilkan senyawa tak larut dalam air (nonpolar). Reaksi penggabungan ion-ion tersebut dapat kita lihat dari Persamaan 2 berikut ini:



Kelarutan kristal MgCO_3 menunjukkan variasi yang berbeda dalam air serta larutan NaCl , NH_4Cl , dan MgCl_2 , seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kelarutan MgCO_3 (a) di dalam air (b) dalam larutan NaCl (c) dalam larutan NH_4Cl (d) dalam larutan MgCl_2 pada suhu yang berbeda. (■ = 15°C ; ● = 25°C ; ▲ = 35°C (Dong *et al.*, 2008).

Ketika larutan dari garam (NaCl), dan kelarutan MgCO_3 , mampu menunjukkan peningkatan larutan NaCl, maka kelarutan MgCO_3 mampu menunjukkan peningkatan hingga mencapai ambang maksimum, namun setelah itu, mengalami penurunan bertahap dengan meningkatnya konsentrasi garam dan kenaikan suhu. Sebaliknya, pada larutan NH_4Cl dan MgCl_2 , kelarutan MgCO_3 cenderung meningkat secara konsisten dengan terjadinya kenaikan suhu. Kerak magnesium karbonat (MgCO_3) yang terbentuk pada pipa-pipa maupun peralatan industri dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kerak magnesium karbonat pada pipa industri (Sihombing, 2025).

2.5. Metode Pencegahan Kerak MgCO_3

Terdapat beberapa metode yang telah diaplikasikan guna mencegah terbentuknya kerak magnesium karbonat (MgCO_3), khususnya pada peralatan industri dan pipa-pipa industri. Beberapa pendekatan dan metode yang dilakukan dapat diuraikan sebagai berikut:

2.5.1. Pengendalian pH

Berdasarkan penjelasan oleh Dera (2018), jika nilai pH semakin tinggi pH, maka tingkat pH semakin tinggi, maka protonasi dari inhibitor juga semakin meningkat, sedangkan jika ditinjau dari nilai pH yang rendah maka tingkat protonasi akan

menurun. Pada keadaan tertentu, jenis inhibitor yang lebih dapat terionisasi, memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghambat pertumbuhan kristal. Sehingga, penggunaan aditif asam bisa digunakan untuk memperlambat kecepatan terbentuknya inti kristal, tetapi jika digunakan dalam konsentrasi yang berlebihan, akan meningkatkan laju korosi pada logam dan menimbulkan korosi di logam tersebut.

2.5.2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air

Metode pelunakan air juga sering digunakan. Metode ini juga dikenal sebagai metode pengurangan kesadahan. Metode dan pendekatan ini, merupakan teknik yang digunakan guna menurunkan kadar-kadar ion tertentu misal kalsium dan magnesium yang terdapat dalam air sadah. Metode ini juga melibatkan proses yang membantu mengurangi dan menghilangkan kandungan mineral sebagai memicu pembentukan kerak. Air yang bebas dari mineral, dapat bekerja pada suhu tinggi dan mampu dalam mengurangi resiko endapan, khususnya di permukaan peralatan industri secara efektif. Namun, dalam menggunakan metode ini diperlukan biaya yang relatif tinggi yang dapat menurunkan kinerja operasional industri (Kamal, 2023).

2.5.3. Penggunaan Inhibitor Kerak

Menurut Husna *et al.*, (2022), metode penggunaan inhibitor kerak adalah suatu metode yang menggunakan senyawa kimia baik organik maupun anorganik dan akan ditambahkan secara bertahap di dalam aliran fluida, khususnya dalam sistem perpipaan guna mencegah terbentuknya kerak. Senyawa inhibitor ini bekerja dengan mengalami reaksi kimia terhadap senyawa yang mampu membentuk kerak, sehingga mampu dalam menstabilkan larutan serta mampu dalam menghambat pertumbuhan kristal. Metode inhibitor ini juga lebih efektif, sederhana, juga ekonomis pada industri, guna mengurangi resiko pembentukan

kerak pada peralatan industri. Pada umumnya, inhibitor kerak dapat digolongkan dengan 2 tipe utama, yaitu inhibitor kerak termodinamika, dan inhibitor kerak kinetika. Kedua jenis inhibitor ini memiliki fungsi masing-masing. Jenis inhibitor kerak termodinamika, dapat berfungsi sebagai zat kompleks maupun agen kelat dan mengikat ion-ion penyebab kerak serta mencegah proses pembentukan juga pengendapan kristal.

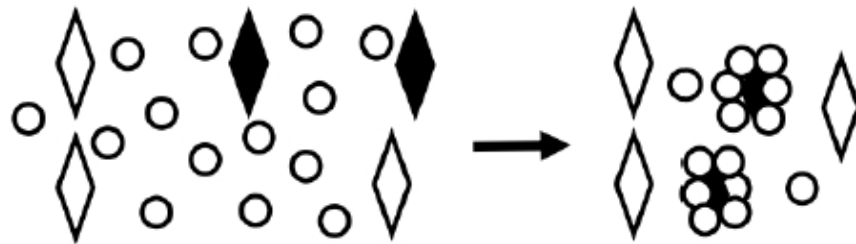
Inhibitor termodinamika memiliki kelemahan yaitu, efektivitasnya yang terbatas khususnya pada sistem dengan konsentrasi garam yang rendah. Sedangkan, jenis inhibitor kinetika adalah jenis inhibitor yang bekerja dengan cara memperlambat laju pembentukan endapan dan berpengaruh terhadap kinetika nukleasi serta pertumbuhan kristal. Melalui mekanisme kinerja inhibitor kinetika tersebut, maka larutan tetap dalam keadaan supersaturasi tanpa adanya pembentukan kerak.

Berdasarkan Syahri dan Sugiarto (2008), ada beberapa aspek penting yang dipertimbangkan dalam memilih inhibitor kerak, misalnya stabilitas senyawa dalam air pada jangka waktu yang lama, khususnya dalam kondisi suhu yang tinggi. Bukan hanya itu saja, namun efektivitas kinerja, efisiensi biaya, serta kesesuaian penggunaannya dalam sistem juga menjadi faktor pertimbangan dalam memilih inhibitor kerak. Inhibitor kerak yang ideal sebaiknya juga memiliki karakteristik seperti kompatibel dengan air laut maupun air hasil produksi, juga mampu dalam mengontrol pembentukan kerak secara efektif walaupun pada konsentrasi yang rendah, serta mampu dalam menunjukkan kestabilan termal yang baik khususnya dalam kondisi produksi.

Menurut Ma *et al.* (2015) senyawa kimia yang ramah lingkungan dapat digunakan sebagai inhibitor dikarenakan mampu dalam membentuk suatu lapisan yang dapat mengadsorpsi permukaan logam, sehingga tidak menimbulkan kerak. Dalam proses adsorpsi ini, dapat dipengaruhi oleh kepadatan dari setiap muatan pada permukaan logam dan muatan dari molekul-molekul inhibitor. Mengacu pada Suharso *et al.* (2019), mekanisme kinerja dari inhibitor kerak dapat dibagi menjadi dua.

Pertama, inhibitor dapat bekerja dengan cara teradsorpsi pada permukaan kristal, khususnya pada tahap awal kerak terbentuk. Senyawa inhibitor yang digunakan memiliki ukuran yang relatif besar, sehingga dapat menutupi kristal yang lebih kecil, juga mampu menghambat proses pertumbuhannya. Kedua, senyawa kimia mampu secara efektif dalam mencegah partikel-partikel halus untuk menempel pada permukaan padat. Lebih lanjut, mekanisme penghambatan laju pertumbuhan kristal oleh inhibitor dijelaskan melalui ilustrasi pada Gambar 6.

Gambar tersebut mampu memperlihatkan bahwa inhibitor dapat menempel di permukaan zona pertumbuhan kristal, dari benih kristal (dapat dilihat dengan simbol warna hitam), sehingga setiap proses pertumbuhannya menjadi terhambat. Sebaliknya, kristal benih yang tidak mengalami adsorpsi oleh inhibitor (di gambarkan dengan simbol tanpa warna), sehingga dapat tumbuh secara normal (Suharso *et al.*, 2014).



Gambar 6. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan (\circ = inhibitor, \diamond = bibit kristal).

Berdasarkan literatur, senyawa penghambat kerak (*scale inhibitor*) yang digunakan di dunia industri dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yakni inhibitor anorganik dan inhibitor organik. Kelompok anorganik antara lain berupa kondensat fosfat dan fosfat dehidrat, yang di dalamnya terdapat gugus fungsi P-O-P yang berfungsi untuk melekatkan diri pada permukaan kristal. Sementara itu, kelompok organik mencakup senyawa organofosfonat serta berbagai jenis polimer organik (Asnawati, 2001).

Salah satu contoh inhibitor yang tergolong murah adalah polifosfat. Senyawa ini bekerja dengan cara teradsorpsi pada permukaan kristal sehingga dapat menghambat proses pertumbuhan kristal lebih lanjut. Akan tetapi, polifosfat memiliki kelemahan, yaitu mudah mengalami hidrolisis pada suhu yang melebihi 90 °C. Hasil hidrolisisnya adalah ortofosfat, yang justru bersifat sebaliknya memicu terbentuknya kerak baru. Reaksi hidrolisis polifosfat ini tidak terjadi secara sembarangan; kecepatan dan tingkat hidrolisisnya sangat bergantung pada beberapa faktor, antara lain suhu (temperatur), derajat keasaman (pH), durasi waktu, serta ada tidaknya ion-ion lain yang turut hadir dalam larutan. (Al-Deffeeri, 2007).

2.6. Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

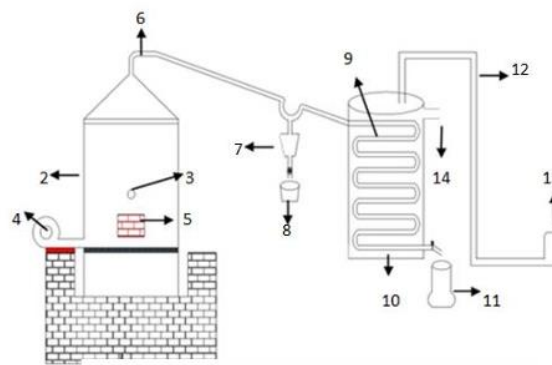
2.6.1. Pirolisis Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Pirolisis didefinisikan sebagai suatu proses dekomposisi termokimia yang fundamental, di mana material biomassa dipanaskan pada suhu tinggi dalam lingkungan dengan sedikit atau tanpa oksigen. Kondisi ini mencegah terjadinya pembakaran sempurna dan memicu pemutusan rantai kimia organik yang kompleks pada biomassa, sehingga mentransformasikannya menjadi produk-produk yang memiliki nilai energi dan ekonomi. Produk utama dari proses ini meliputi *bio-oil* sebagai fraksi cair yang berpotensi sebagai substitusi minyak bakar, *biochar* dalam wujud padatan karbon padat yang berguna untuk pertanian dan penyerapan karbon, serta *syngas* berupa gas yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit energi. (Novita dkk., 2021).

Menurut Basu (2010), proses pirolisis biomassa umumnya beroperasi pada kisaran suhu 300 °C hingga 600°C. Teknik ini diakui memiliki tingkat efisiensi dan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konversi termokimia lainnya. Dalam prosesnya, fraksi cair (*bio-oil*) yang terbentuk merupakan produk intermediet yang dapat diolah lebih lanjut melalui berbagai proses upgrading

untuk menghasilkan *biofuel* yang lebih bernilai, seperti biodiesel atau bioethanol. Suhu memegang peran kritis. Suhu pembakaran umumnya dimulai pada 300 °C, dengan suhu optimum untuk memaksimalkan hasil bio-oil berada pada rentang 450°C hingga 550°C, yang sangat bergantung pada karakteristik biomassa dan parameter proses lainnya.

Suhu di bawah 300 °C umumnya kurang efektif untuk memulai proses pirolisis dan lebih sesuai untuk bahan baku kering tertentu. Seperti yang diungkapkan oleh Novita dkk. (2021), rendemen *bio-oil* akan meningkat seiring kenaikan suhu hingga mencapai titik optimal, namun akan mengalami penurunan jika suhu menjadi terlalu tinggi akibat terjadinya dekomposisi sekunder. Kendala utama terletak pada sifat *bio-oil* mentah yang tidak dapat langsung diaplikasikan dalam infrastruktur energi yang ada karena masih memiliki beberapa kelemahan, seperti nilai kalor yang rendah, ketidakstabilan, dan sifat korosif yang disebabkan oleh kandungan senyawa oksigenat yang tinggi (Sharifzadeh *et al.*, 2019). Ridhuan (2019), menjelaskan terkait proses pirolisis yang sangat dipengaruhi dengan faktor-faktor utama tertentu, misal jenis bahan baku, kenaikan suhu, serta lama waktu pemanasan. Bukan hanya itu, Ridhuan juga menjelaskan bahwa proses pirolisis sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan organik, semisal bahan yang memiliki tekstur keras, akan diperlakukan pemanasan dengan suhu yang tinggi serta lama waktu maksimum yang bertujuan untuk memecah struktur-struktur bahan. Dikarenakan, semakin tinggi suhu yang dipakai dalam proses pirolisis, akan menghasilkan volume asap cair dalam jumlah yang banyak, jika dilakukan perbandingan dengan residu biomassa. Selain itu, lama pemanasan juga mempengaruhi komposisi asap cair yang dihasilkan, pemanasan yang semakin lama akan menghasilkan volume asap cair yang semakin banyak yang jika dilakukan perbandingan dengan limbah biomassa. Dan, jika semakin cepat waktu pemanasan, maka volume asap cair yang dihasilkan tidak mencapai batas maksimum dan akan lebih sedikit jika dilakukan perbandingan dengan residu biomassa. Alat pirolisis dapat dilihat pada Gambar 7.



Keterangan gambar :

- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| 1. Tungku bakar ruang | 8. Penampung TAR |
| 2. Pembakaran | 9. Kondensor |
| 3. Thermoeter | 10. Kondensor |
| 4. Blower | 11. Penampung asap cair |
| 5. Pintu ruang bakar | 12. Pipa aliran air masuk |
| 6. Pipa aliran asap | 13. Pompa air |
| 7. Penangkap TAR | 14. Pipa aliran air keluar |

Gambar 7. Alat Pirolisis

Menurut Yulistiani (2008), asap cair diketahui memiliki lebih dari 400 komponen yang berfungsi sebagai pengambat dalam pertumbuhan bakteri. Dikarenakan, terdapat senyawa asam, senyawa fenolat, dan senyawa karbonil. Serta dianggap cukup aman sebagai pengawet alami, termasuk di dalamnya asam, fenolat, dan karbonil.

Dalam pengertiannya, asap cair merupakan produk yang dihasilkan melalui proses kondensasi maupun pengembunan yang berasal dari uap hasil pembakaran bahan-bahan organik, dan melalui proses pirolisis. Asap cair yang dihasilkan dari hasil pirolisis memiliki beberapa unsur utama, sebagai karakteristik dan komponen kimia, seperti karbon, hidrogen, maupun oksigen. Bukan hanya itu saja, namun asap cair juga mengandung beberapa senyawa asam organik dan juga air sebagai suatu bagian dari komponen asap cair. Banyak manfaat yang terdapat pada asap cair, khususnya manfaat fungsional, seperti bahan pengawet alami, koagulan lateks, pewarna alami dalam memberikan nuansa dan corak coklat, sebagai insektida organik, juga bermanfaat sebagai inhibitor (penghambat) (Sarwendah *et al.*, 2019).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan Sarwendah *et al* (2019), asap cair yang didapatkan dengan proses pirolisis, mampu memiliki komposisi kimia yang

bervariasi dan sangat tergantung dengan jenis bahan baku yang dipakai selama proses pirolisis. Kualitas asap cair umumnya ditentukan oleh kandungan fenol dan asam organik. Semakin tinggi konsentrasi fenol, maka semakin kuat kemampuan asap cair dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme, sedangkan nilai pH yang rendah menjadi indikator kualitas asap cair yang lebih baik.

Pada penelitian ini, digunakan cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan asap cair yang akan dijadikan sebagai inhibitor kerak magnesium karbonat. Cangkang kelapa sawit ini, dihasilkan dari limbah padat kelapa sawit yang didapatkan dari hasil komoditi perkebunan kelapa sawit. Menurut Wahyuni dan Fathoni (2019), salah satu produk yang dapat dibuat dari limbah cangkang kelapa sawit adalah karbon aktif yang memiliki nilai ekonomis dan ramah lingkungan. Cangkang kelapa sawit, memiliki ukuran dan ketebalan yang bervariasi di setiap tempat, tergantung daerah asal dan jenis buah sawit yang dihasilkan. Di Indonesia, memiliki 3 jenis kelapa sawit yang digolongkan ketebalan cangkang kelapa sawit yaitu:

1. Pisifera (Cangkang yang sangat tipis hingga tidak bercangkang)
2. Tenera (Ketebalan cangkang 0,5 mm sampai sekitar 3,5 mm)
3. Dura (Ketebalan cangkang 2 mm sampai sekitar 6 mm)

Cangkang kelapa sawit dapat dilihat dalam Gambar 8.



Gambar 8. Cangkang kelapa sawit (Herman dan Rolly, 2018).

Penelitian oleh Sarwendah *et al.* (2019) menunjukkan bahwa asap cair dari cangkang kelapa sawit mengandung asam asetat dan fenol dalam jumlah yang dominan. Selanjutnya, peningkatan suhu selama pirolisis berbanding lurus dengan peningkatan kadar fenol dalam asap cair (Oramahi *et al.*, 2021). Kandungan fenol

tersebut dipengaruhi oleh kadar lignin pada bahan baku, di mana semakin tinggi kadar lignin maka semakin besar konsentrasi fenol yang dihasilkan. Sebaliknya, kandungan asam asetat cenderung meningkat seiring dengan tingginya kandungan selulosa (Asmawit dan Hidayati, 2016). Senyawa kimia yang terdapat dalam asap cair berbahan dasar cangkang kelapa sawit berasal dari hasil penguraian komponen utama penyusunnya, yaitu selulosa, lignin, dan hemiselulosa, akibat proses pemanasan. Sebelum diolah menjadi asap cair, cangkang kelapa sawit memiliki kandungan lignin sebesar 29,4%, selulosa 26,6%, hemiselulosa 27,7%, kadar abu 0,6%, kadar air 8%, serta zat ekstraktif sekitar 4,2%. Menurut Pratama dan Sa'diyah (2023), senyawa yang terkandung dalam asap cair meliputi fenol, karbonil (seperti keton dan aldehid), asam, ester, alkohol, lakton, serta hidrokarbon alifatik dan aromatik polisiklik. Senyawa fenol terbentuk dari proses degradasi lignin yang terjadi pada rentang suhu 300–400 °C. Sementara itu, asam asetat dan air dihasilkan dari penguraian selulosa menjadi glukosa. Cangkang kelapa sawit mengandung sekitar 26 jenis senyawa kimia yang terdiri atas golongan fenol, eter, senyawa fenolik, furfural, furan, dan asam asetat. Asap cair yang dihasilkan melalui proses pirolisis cangkang kelapa sawit pada suhu 400 °C mengandung senyawa fenol sebesar 43,03 ppm serta senyawa asam. Dan mengidentifikasi 12 senyawa kimia dalam asap cair tanpa proses destilasi, dengan komponen dominan berupa asam asetat (39,15%), 1,2,3-propanetriol (7,18%), dan 1,2-benzenediol (7,03%). Setelah melalui destilasi, diperoleh tujuh senyawa kimia dengan kandungan asam asetat tertinggi, yaitu sebesar 49,39%.

Dimana, urutan senyawa dalam asap cair yang berperan sebagai antioksidan dan antibakteri adalah dihidroksibenzen > 2,6-dimetoksifenol > 2-metoksifenol.

Berdasarkan uraian sebelumnya, asap cair yang dihasilkan dari cangkang kelapa sawit memiliki karakteristik kimia dan fisika sebagai berikut:

1. Sifat kimia

Asap cair mengandung berbagai senyawa fenolik yang berfungsi sebagai antioksidan sekaligus antimikroba. Keberadaan asam asetat dan sejumlah asam organik lainnya memberikan sifat keasaman yang cukup tinggi, sehingga meningkatkan efektivitasnya dalam menghambat pertumbuhan bakteri.

Umumnya, asap cair dari cangkang kelapa sawit memiliki pH berkisar antara 2–3, menandakan sifatnya yang sangat asam. Keasaman tersebut berasal dari kandungan asam-asam organik seperti asam asetat dan asam laktat. Tingkat keasaman yang tinggi ini berperan penting dalam menciptakan kondisi yang tidak mendukung kehidupan mikroorganisme. Selain itu, kandungan fenol dan beberapa senyawa lain di dalam asap cair dapat membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam, sehingga mampu menekan pembentukan kerak baru. Komponen lain seperti aldehida dan keton bersifat mudah menguap (volatil), menyebabkan proses penguapan terjadi lebih cepat. Namun, sifat volatil ini juga membuat kemampuan pembersihan dan pengikatan kerak oleh senyawa tersebut dapat berkurang seiring waktu (Firna dkk., 2014).

2. Sifat fisika

Secara fisik, asap cair dari cangkang kelapa sawit memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan air, sehingga mudah menyebar di permukaan kerak. Viskositasnya yang rendah memungkinkan asap cair menembus celah-celah sempit di antara kerak dan dinding pipa, membantu penyebaran ke seluruh permukaan dan meningkatkan efektivitasnya dalam melunakkan serta melarutkan kerak. Titik didih asap cair bervariasi tergantung pada komposisinya, namun sebagian besar komponen seperti air, asam organik, dan fenol memiliki titik didih relatif rendah. Oleh karena itu, senyawa volatil seperti aldehida dan keton cenderung cepat menguap ketika terpapar suhu tinggi. Semakin rendah kadar air yang terkandung dalam cangkang kelapa sawit, maka semakin tinggi pula nilai berat jenisnya. Kandungan air pada bahan baku ini berpengaruh terhadap jalannya proses pirolisis serta jumlah rendemen asap cair yang dihasilkan. Kadar air yang tinggi dapat memperlambat proses pembentukan asap cair karena tahap karbonisasi berlangsung lebih lama, kurang sempurna, dan membutuhkan suhu pirolisis yang lebih tinggi. Kondisi tersebut biasanya menghasilkan rendemen asap cair yang lebih rendah namun meningkatkan jumlah arang yang terbentuk. Berdasarkan hasil penelitian, uji berat jenis dilakukan untuk membandingkan bahan pirolisis antara cangkang kelapa sawit dan tempurung kelapa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa cangkang kelapa sawit memiliki tekstur yang lebih keras, sehingga memerlukan waktu karbonisasi yang lebih lama

serta suhu pirolisis yang lebih tinggi, namun mampu menghasilkan volume asap cair yang lebih besar (Firna dkk., 2014). Titik didih senyawa-senyawa pendukung sifat fungsional asap cair dalam keadaan murni hasil GC-MS ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komponen kimia asap cair cangkang sawit

Nomor Peak	Waktu Retensi (menit)	Perkiraan Senyawa	Konsentrasi (%)
1	4,011	Karbon dioksida	27,08
2	16,034	Fenol	8,42
3	18,200	3-meil fenol	1,26
4	18,627	Guaiakol	2,54
5	20,626	2-metoksi-4-metil fenol	4,28
6	21,296	1-heksadekana	0,59
7	21,429	n-pentadekana	0,64
8	21,792	3-metoksi-pirokatekol	1,35
9	22,002	1-bromododekana	1,89
10	22,720	4-etenil-2-metoksi fenol	1,98
11	23,116	3,4-dimetoksi fenol	1,40
12	23,677	n-heksadekana	0,58
13	24,139	1,2,4-trimetoksibenzena	0,90
14	25,147	2-tridekanon	0,81
15	25,418	Levoglukosan	6,23
16	25,468	Metil ester dodekanoat	2,17
17	25,967	Asam dodekanoat	10,68
18	26,351	4-metil-2,5-dimetoksibenzaldehida	1,19
19	27,429	2-propenil ester oktadekanoat	1,00
20	28,033	Metil ester tetradekanoat	3,23
21	28,451	Asam tetradekanoat	2,18
22	29,676	Metil ester heksadekanoat	12,08
23	30,147	2-heptadekanon	0,74
24	32,462	Metil ester 8-okadekanoat	1,10
25	37,516	3-metil-4-(metiltiol)-fenil ester	2,14

Sumber: Haji dkk, 2010

Berdasarkan penelitian Bancin (2021), mengungkapkan bahwa asap cair yang diperoleh dari pirolisis cangkang kelapa sawit mempunyai kandungan-kandungan fenol dengan kadar tinggi dibandingkan dengan asap cair yang berasal dari pelepah sawit ataupun tandan kosong kelapa sawit. Komposisi fenol dalam asap cair cangkang kelapa sawit mencapai sekitar 20,24%, yang jika dibandingkan dengan tandan kosong mencapai 16,88 %.

Dari penjelasan yang diungkapkan oleh Bancin dan rekan-rekan (2021), menyatakan bahwa semakin tinggi kandungan dan komposisi lignin pada biomassa, serta semakin tinggi suhu pirolisis, maka jumlah fenol dalam asap cair

ini pun semakin meningkat. Dalam penelitian tersebut, dilakukan prosedur pengeringan biomassa dibawah sinar matahari selama minimal tiga hari, setelahnya, dilakukan pirolisis dalam reaktor pirolisis dengan suhu 350°C, dengan model variasi waktu dalam rentang 60 menit-180 menit. Pada waktu pirolisis 180 menit, rendemen asap cair mencapai tingkat maksimum yang dihasilkan yakni, dalam persentase 11,01 %.

2.7. Metode *Unseeded Experiment*

Metode *Unseeded Experiment* merupakan salah satu pendekatan dalam kajian pembentukan kristal, dengan cara tanpa menambahkan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan. Pada metode ini, larutan yang mengandung ion Mg^{2+} dan CO_3^{2-} dijaga pada kondisi jenuh atau mendekati jenuh, sehingga proses nukleasi dan pertumbuhan kristal dapat berlangsung secara spontan tanpa dipengaruhi oleh keberadaan kristal awal. Dengan cara ini, peneliti dapat mengamati jalannya pembentukan endapan $MgCO_3$ sejak tahap awal, termasuk mekanisme nukleasi primer, ukuran partikel yang terbentuk, serta laju pertumbuhan kerak pada permukaan tertentu (Aisah, 2016).

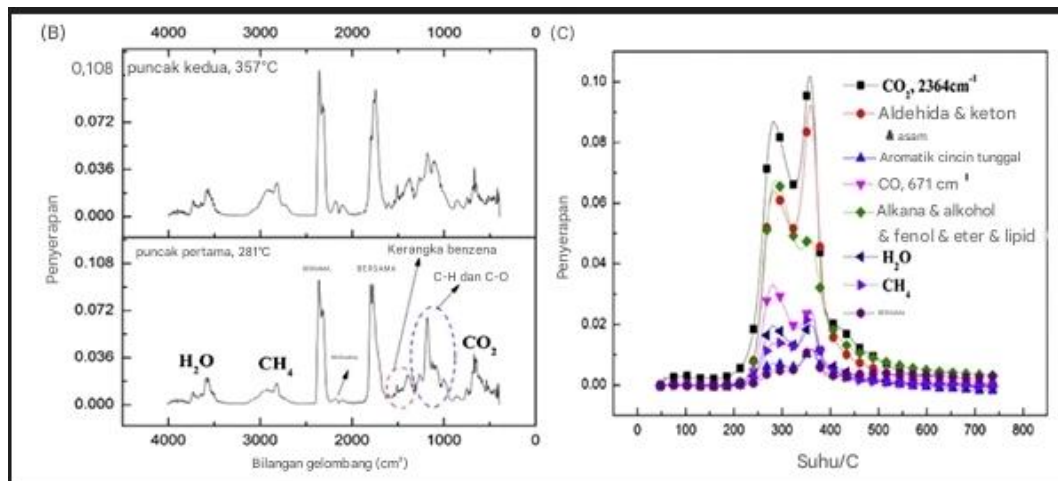
2.8. Analisis dan Karakterisasi Kerak $MgCO_3$

Dalam penelitian ini, akan dilakukan berbagai analisis serta karakterisasi terhadap kerak $MgCO_3$ yang telah terbentuk. Analisis yang dilakukan mencakup penggunaan spektroskopi FTIR sebagai salah satu metode identifikasi struktur senyawa guna mengetahui keberadaan gugus fungsional utama dalam sampel. Selain itu, analisis GC-MS digunakan untuk menentukan komponen senyawa kimia dalam inhibitor campuran. Karakterisasi dengan XRD bertujuan untuk mengamati struktur kristal dari kerak $MgCO_3$. Sementara itu, morfologi permukaan kristal $MgCO_3$ dianalisis menggunakan SEM, dan distribusi ukuran partikel diuji dengan PSA. Seluruh analisis serta karakterisasi ini dilakukan untuk

menilai efektivitas penggunaan asap cair cangkang kelapa sawit dalam pengaruh dan variasi suhu saat pirolisis sebagai inhibitor ramah lingkungan pada kerak $MgCO_3$.

2.8.1. Spektrofotometer InfraRed (IR)

Menurut Sopyan (2020), mendefinisikan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) sebagai suatu metode yang digunakan guna mengidentifikasi gugus-gugus fungsi dalam suatu zat, baik dalam zat gas, cair, maupun padat, menggunakan radiasi inframerah. Metode FTIR, bekerja dengan mendeteksi terjadinya penyerapan sinar inframerah untuk ikatan-ikatan dalam molekul, lalu akan menghasilkan spektrum dah di interpretasikan dalam bentuk persen transmisi terhadap bilangan gelombang. Penjelasan ini kemudian dikaitkan oleh Mohamed *et al* (2017), mengenai prinsip dasar dari FTIR, yakni melibatkan terjadinya interaksi molekul dan juga senyawa dengan adanya energi, khususnya dari sinar inframerah, kemudian berdampak pada molekul yang mengalami vibrasi. Nilai energi vibrasi sangat bergantung dengan jenis atom juga kekuatan ikatan, yang menyebabkan setiap komponen molekul memiliki frekuensi yang berbeda. Pada perbedaan frekuensi antar setiap molekul, memungkinkan proses identifikasi gugus-gugus fungsi maupun komponen tertentu dalam suatu molekul. Mekanisme kerja dari spektrofotometer FTIR ini, dimulai dari cahaya inframerah yang kemudian diarahkan ke sampel melalui sebuah celah dan berfungsi untuk mengontrol jumlah energi yang masuk. Lalu, sebagian sinar akan diserap oleh sampel, dan sisa lainnya akan di transmisikan pada permukaan-permukaan tertentu dajn diarahkan menuju detektor, lalu dikirimkan ke komputer untuk dianalisis lebih lanjut. Adapun spektrum FTIR dari asap cair cangkang kelapa sawit bisa dilihat di Gambar 9.



Gambar 9. Spektrum FTIR Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit (Ma *et al.*, 2015)

Dari hasil analisis FTIR, beberapa pita serapan utama dapat diinterpretasikan berdasarkan posisi dan intensitas bilangan gelombangnya. Pita serapan pada rentang 4000–3400 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus hidroksil ($-\text{OH}$) yang berasal dari air, alkohol, atau fenol. Keberadaan gugus ini menandakan bahwa senyawa hasil pirolisis masih mengandung komponen polar seperti air terikat atau senyawa oksigenat. Pada rentang 3000–2700 cm^{-1} , teramati getaran peregangan C–H yang menunjukkan keberadaan senyawa alkana atau hidrokarbon jenuh, menandakan adanya komponen alifatik dalam produk pirolisis. Selanjutnya, pita serapan pada daerah 2400–2250 cm^{-1} berkaitan dengan getaran peregangan C=O dari karbon dioksida (CO_2), yang dapat berasal dari gas hasil reaksi pirolisis maupun residu gas yang terperangkap dalam sampel.

Rentang 2250–2000 cm^{-1} menunjukkan getaran peregangan C≡O yang mengindikasikan keberadaan karbon monoksida (CO) atau gugus karbonil dengan ikatan rangkap tiga, yang terbentuk akibat proses dekarbonilasi selama pirolisis berlangsung. Sementara itu, pita serapan kuat pada daerah 1900–1650 cm^{-1} merupakan ciri khas dari gugus karbonil (C=O) yang berasal dari senyawa aldehid, keton, dan asam karboksilat, menunjukkan bahwa sebagian besar produk hasil pirolisis masih mengandung oksigen. Pada rentang 1690–1450 cm^{-1} , terdeteksi getaran peregangan C=C yang menunjukkan keberadaan senyawa aromatik atau struktur cincin benzena. Hal ini mengindikasikan pembentukan

senyawa aromatik selama proses pirolisis, terutama pada suhu tinggi. Daerah $1475\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ dikenal sebagai daerah sidik jari (*fingerprint region*), yang mencakup getaran peregangan C–O dari senyawa alkohol, fenol, eter, dan lipid, menandakan bahwa beberapa komponen hasil pirolisis masih memiliki gugus oksigenat. Terakhir, pita serapan pada $586\text{--}726\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran lenturan C=O, yang semakin memperkuat adanya senyawa karbonil dalam hasil pirolisis asap cair cangkang kelapa sawit (Ma *et al.*, 2015)

Keberadaan berbagai gugus fungsional oksigenat seperti –OH, C=O, dan C–O menunjukkan bahwa asap cair hasil pirolisis cangkang kelapa sawit memiliki karakteristik kimia yang reaktif dan mampu berinteraksi dengan permukaan mineral seperti magnesium karbonat (MgCO_3). Gugus hidroksil (–OH) dan karbonil (C=O) dapat berperan dalam pembentukan ikatan hidrogen atau kompleksasi dengan ion Mg^{2+} , sehingga menghambat proses pengendapan dan pertumbuhan kristal MgCO_3 pada permukaan logam. Interaksi ini terjadi karena gugus-gugus tersebut menyediakan pasangan elektron bebas yang dapat berkoordinasi dengan kation divalen, sehingga menurunkan konsentrasi ion Mg^{2+} bebas yang tersedia untuk membentuk inti kristal dalam larutan.

Selain itu, gugus fenolik dan karbonil juga berpotensi bertindak sebagai agen khelat (*chelating agent*) yang menstabilkan ion logam dalam larutan, sehingga mencegah pembentukan kerak (*scale*). Senyawa fenolik yang terkandung dalam asap cair diketahui memiliki afinitas tinggi terhadap permukaan mineral karbonat karena gugus –OH aromatiknya mampu membentuk ikatan yang lebih kuat dibandingkan gugus alifatik biasa. Keberadaan struktur aromatik dalam senyawa fenolik juga memungkinkan terjadinya interaksi π dengan permukaan kristal, yang semakin memperkuat mekanisme adsorpsi inhibitor pada situs aktif pertumbuhan kristal MgCO_3 .

Oleh karena itu, analisis FTIR dalam penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi keberadaan gugus fungsional utama dalam asap cair cangkang kelapa sawit, tetapi juga memberikan gambaran mengenai potensi asap cair hasil pirolisis pada variasi suhu $300\text{ }^\circ\text{C}$, $400\text{ }^\circ\text{C}$, dan $500\text{ }^\circ\text{C}$ sebagai inhibitor kerak MgCO_3 . Perbedaan suhu

pirolisis yang digunakan diperkirakan menghasilkan komposisi gugus fungsi yang berbeda, sehingga berpengaruh terhadap efektivitas inhibitor yang dihasilkan.

Keterangan bilangan gelombang dari spektrum IR yang dihasilkan pada Gambar 9 disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Gugus Fungsional Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Senyawa	Rentang Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsional	Vibrasi
H ₂ O	4000–3400	O–H	Peregangan
CH ₄	3000–2700	C–H	Peregangan
CO ₂	2400–2250	C=O	Peregangan
CO	2250–2000	C≡O	Peregangan
Aldehid, keton, asam	1900–1650	C=O	Peregangan
Aromatik	1690–1450	C=C, kerangka benzena	Peregangan
Alkana, alkohol, fenol, eter, lipid	1475–1000	C–O, C=C, kerangka karbon	Peregangan
CO ₂	586–726	C=O	Lenturan
<i>(Detail di daerah sidik jari dari 1475 hingga 1000 cm⁻¹)</i>			
Alkana	1460–1365	C–C, C–H	Peregangan
Alkohol	1200–1000	C–O	Peregangan
Fenol	1300–1200	C–O	Peregangan
Eter	1275–1060	C–O	Peregangan
Lipid	1300–1050	C=O	Peregangan

Sumber: Ma *et al.*, 2015

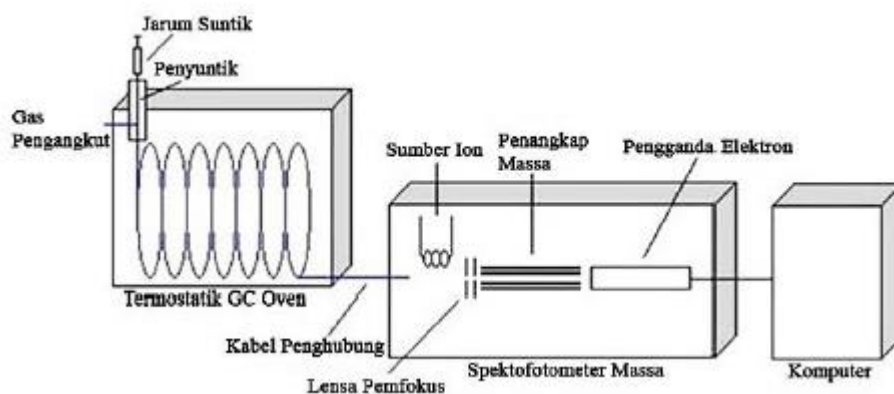
2.8.2. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Menurut Darmapatni *et al.* (2016), mendefinisikan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) sebagai suatu teknik analisis dalam perpaduan metode kromatografi gas dengan spektrometri massa. Dimana, kromatografi gas berperan untuk memisahkan senyawa-senyawa yang mudah menguap (*volatile compound*), pada saat pemanasan dalam keadaan vakum tinggi, tekanan yang rendah.

Sedangkan, spektrometri massa berfungsi dalam menentukan massa molekul, rumus molekul, maupun ion-ion yang bermuatan. sedangkan spektrometri massa

digunakan untuk menentukan massa molekul, rumus molekul, serta menghasilkan ion-ion bermuatan (Darmapatni *et al.*, 2016).

Metode GC-MS sangat efektif untuk mendeteksi senyawa dalam konsentrasi-konsentrasi yang rendah, dan dapat berguna untuk mengidentifikasi metabolit-metabolit sekunder khususnya pada tumbuhan, dalam bentuk kromatogram dan spektrum massa. Dari penjabaran tersebut, Margareta dan Wonorahardjo (2023), mendefinisikan GC-MS sebagai suatu metode analisis yang kemudian digunakan guna memisahkan juga mengidentifikasi komponen-komponen campuran, misal senyawa yang mudah menguap. GC-MS menjadi salah satu metode yang menggabungkan dua instrumen utama, yaitu kromatografi gas yang berfungsi sebagai pemisah dan spektrometri massa yang berperan sebagai pendeteksi. Dengan demikian, tujuan utama dari penggunaan GC-MS adalah memisahkan berbagai komponen-komponen senyawa dalam sampel dengan berdasarkan perbedaan titik didih ataupun interaksi antar analit dengan fase diam juga fase geraknya. Skema alat GC-MS seperti yang telah dijelaskan ditunjukkan pada Gambar 10.



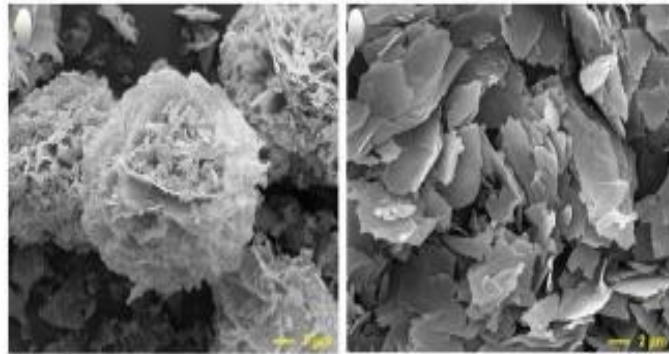
Gambar 10. Skema GC-MS (Simangunsong, 2018)

2.8.3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Menurut Setyaningsih dan Septiano (2019), mendefinisikan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah jenis dari mikroskop elektron dan mampu

menghasilkan resolusi tinggi, dari Gambaran permukaan sampel. Dalam prinsip kerjanya, SEM memanfaatkan adanya hamburan balik dari elektron (*electron beam*), khususnya pada permukaan objek dan kemudian mengambil gambar guna mendeteksi elektron yang terdapat pada permukaan objek. Rahmawati dan Nuraliyah (2024), menjelaskan prinsip kerja SEM yang diawali dari pembangkitan sinar elektron oleh suatu pistol elektron, dan dipercepat dengan menggunakan anoda. Elektron-elektron tersebut diarahkan menggunakan lensa magnetik pada permukaan sampel. Sinar-sinar elektron yang sudah difokuskan, kemudian menempati permukaan sampel secara menyeluruh dengan bantuan-bantuan koil pemindai. Dalam kondisi, sinar elektron kemudian mengenai sampel, maka terjadi emisi elektron sekunder, khususnya dari permukaan sampel, lalu ditangkap oleh detektor dan diinterpretasikan melalui citra pada layar monitor.

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang dapat digunakan untuk mengamati dan menganalisis karakteristik struktur mikro pada material padat, baik yang bersifat konduktif maupun non konduktif. Pencahayaan pada SEM menggunakan radiasi elektron dengan panjang gelombang sekitar $200 - 0,1 \text{ \AA}$, menghasilkan daya pisah tinggi hingga sekitar 5 nm. Hal ini memungkinkan pencitraan dengan perbesaran mencapai ± 100.000 kali dan menghasilkan Gambar yang tampak tiga dimensi karena memiliki *depth of field* yang tinggi. Oleh sebab itu, SEM mampu memberikan hasil pencitraan yang lebih baik dibandingkan mikroskop optik. Secara prinsip, mikroskop elektron dapat digunakan untuk mengamati morfologi, struktur mikro, komposisi, serta distribusi unsur dalam suatu material. Untuk analisis komposisi unsur secara kualitatif dan kuantitatif, SEM dapat dikombinasikan dengan perangkat tambahan seperti EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometer*) atau WDS (*Wavelength Dispersive X-ray Spectrometer*) (Muhammad Fikri, 2019,). Contoh hasil analisis SEM untuk kerak magnesium karbonat (MgCO_3), dapat dilihat pada Gambar 11 sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chen *et al* (2020).



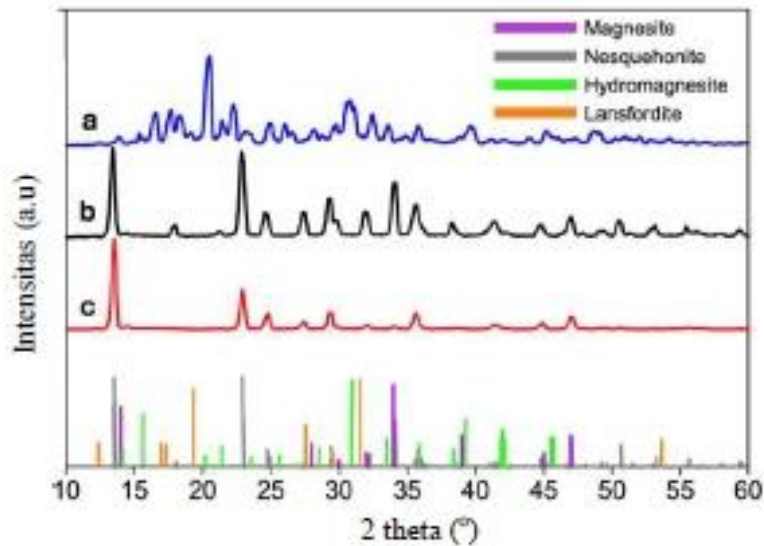
Gambar 11. Analisis SEM MgCO_3 (Chen *et al.*, 2020).

2.8.4. Difraksi Sinar-X (X-RD)

Farihah (2025), menjelaskan bahwa *X-Ray Diffraction* (XRD), menjadi suatu metode analisis yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi suatu fasa kristalin pada material tertentu, dengan cara melakukan pengukuran parameter struktur kisi kristal, juga menentukan ukuran partikel. Metode XRD ini juga bekerja dengan prinsip pemantulan sinar-X oleh kisi kristal, yang memungkinkan identifikasi dari jenis fasa kristalin yang terdapat dalam sampel. XRD juga menjadi teknik analisis yang mengidentifikasi distribusi ukuran partikel, juga sifat kristalinitas dari material yang dianalisis.

Dalam analisis yang menggunakan XRD, kristal-kristal akan memantulkan sinar-X yang kemudian dipancarkan oleh sumber tertentu dan ditangkap oleh pendeteksi (*detector*). Dalam keadaan berkas sinar-X berinteraksi terhadap permukaan kristal, maka sebagian dari sinar-X tersebut akan ditransmisikan, diserap, lalu dipantulkan, dan sebagian lainnya akan mengalami hamburan juga difraksi. Sinar-X yang mengenai suatu material akan dipantulkan, dan menghasilkan spektrum pantulan khusus, dan berkaitan pada struktur kisi kristal yang dianalisis. Penelitian yang dilakukan oleh stopic *et al* (2019), menyelidiki struktur dan karakteristik kerak magnesium karbonat (MgCO_3) yang dapat dilihat dalam Gambar 12. Pengujian difraksi dilakukan untuk menyelidiki struktur serta

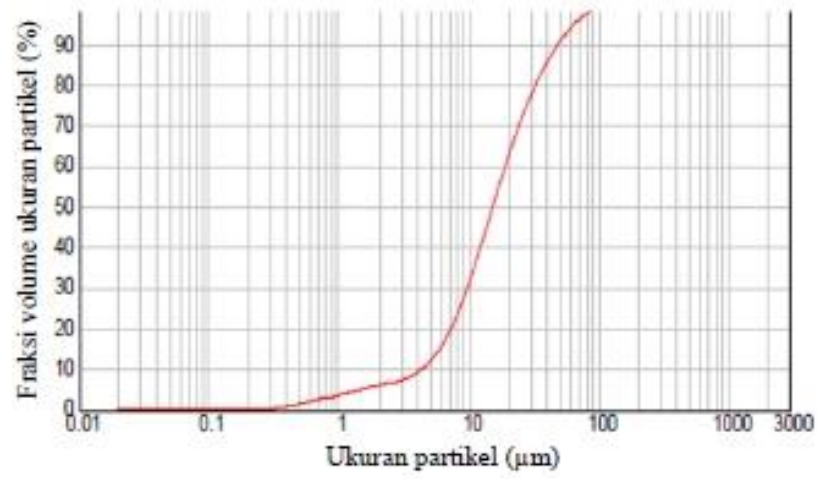
karakteristik dari kerak magnesium karbonat (MgCO_3). Adapun contoh hasil analisis XRD pada kristal MgCO_3 pada Gambar 12.



Gambar 12. Analisis XRD MgCO_3 (Stopic *et al.*, 2019).

2.8.5. Partikel Size Analyzer (PSA)

Fitriani dkk (2024), menjelaskan pengertian dari *particle size analyzer* (PSA) yaitu, metode analisis yang dapat digunakan dalam menentukan ukuran partikel pada suatu sampel dengan memanfaatkan adanya hamburan cahaya dan ditembakkan pada sampel, serta guna mengukur volume dari tiap partikel yang terdapat di dalam sampel. Sampel yang dianalisis, adalah sampel dengan bentuk disperse. Dalam prinsip kerjanya, PSA bekerja dengan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS), yang dilakukan dengan menembakkan sinar laser ke dalam sampel, dan menyebabkan penghamburan cahaya. Hamburan-hamburan cahaya tersebut dapat dideteksi dari sudut-sudut tertentu secara cepat. Pada Gambar 13 adalah contoh hasil analisis PSA, khususnya pada kristal MgCO_3 yang telah dilakukan oleh Stopic *et al.* (2019).



Gambar 13. Analisis PSA MgCO₃ (Stopic *et al.*, 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

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

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu FTIR merek Cary 630 Agilent (Amerika Serikat), PSA merek Cilas Otsuka (Jepang), SEM merek ZEISS EVO MA 10 (Jerman), GC-MS merek Shimadzu QP 2010 SE (Jepang), XRD merek PANalytical 29 MPD PW 3040/60 (Belanda), 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 yang sering digunakan di laboratorium.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (heksahidrat), $NaHCO_3$, aquades, kertas saring, kupon logam, dan asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pembuatan Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Asap cair yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari cangkang kelapa sawit melalui proses pirolisis. Pembuatan asap cair cangkang kelapa sawit dilaksanakan di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Cangkang kelapa sawit dicuci dan dikeringkan dibawah sinar matahari langsung. Cangkang yang sudah kering dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, kemudian dipirolisis selama 2-4 jam dengan variasi suhu pirolisis 300 °C, 400 °C, dan 500 °C sampai asap cair berhenti menetes. Asap yang keluar dari reaktor dialirkan melalui pipa ke rangkaian kondensor, dimana asap tersebut akan mengalami kondensasi dan berubah menjadi bentuk asap cair. Asap cair yang keluar dari kondensor kemudian ditampung dalam wadah penampungan. Kemudian dilakukan analisis menggunakan spektrofotometer FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam asap cair cangkang kelapa sawit dan analisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen senyawa kimianya serta dilakukan penimbangan *biochar* yang dihasilkan, pengukuran tar, dan efisiensi penggunaan gas.

3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit

Pembuatan inhibitor diawali dengan membuat larutan stok asap cair cangkang kelapa sawit variasi konsentrasi 5, 10,15, dan 20 ppm. Larutan stok asap cair 2000 ppm dibuat dengan melarutkan 2 gram asap cair dalam labu ukur hingga volume

1000 mL akuades, lalu dihomogenkan sehingga diperoleh larutan stok dengan konsentrasi 2000 ppm. Pembuatan larutan inhibitor asap cair dengan konsentrasi 5 ppm dilakukan dengan mengambil 1,25 mL larutan stok kemudian ditambah 500 mL akuades di dalam labu ukur hingga tanda batas, lalu dihomogenkan sehingga diperoleh larutan inhibitor dengan konsentrasi 5 ppm. Kemudian diukur nilai keasamannya menggunakan pH meter. Perlakuan yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 10 ppm, 15 ppm, dan 20 ppm dengan variasi suhu hasil pirolisis 300, 400, dan 500 °C. Untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat di dalam asap cair cangkang kelapa sawit, dilakukan analisis menggunakan FTIR dan untuk mengetahui adanya komponen senyawa kimia yang terdapat di dalam asap cair tempurung kelapa dilakukan pula analisis menggunakan GC-MS dengan variasi suhu hasil pirolisis 300,400, dan 500 °C.

3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$)

Tahapan untuk menguji pengujian asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor dalam pengendapan kristal $MgCO_3$ dengan metode *unseeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Magnesium Karbonat Tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode *Unseeded Experiment* menggunakan Kertas Saring

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0,003 M dan $NaHCO_3$ 0,003 M masing-masing dalam 100 mL akuades. Kemudian, masing- masing larutan dimasukkan kedalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0,003 M dan larutan $NaHCO_3$ dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15

menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak magnesium karbonat dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan magnesium karbonat yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam waterbath selama 4 jam pada suhu 80 °C 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 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ dan $NaHCO_3$ sebesar 0,003; 0,004; 0,005; 0,010 M untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak $MgCO_3$ tanpa penambahan inhibitor sebesar 0,0015; 0,002; 0,0025 dan 0,0050 M. 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.

3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak $MgCO_3$ dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu Pirolisis 300, 400, dan 500 °C menggunakan Metode *Unseeded Experiment* dengan Kertas Saring

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0,003 M dan $NaHCO_3$ 0,003 M masing-masing dalam 100 mL inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit 5 ppm hasil pirolisis pada suhu 300 °C, 400 °C, dan 500 °C.

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 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0,003 M dan $NaHCO_3$ 0,003 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak $MgCO_3$ dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter. Larutan $MgCO_3$ 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 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan NaHCO_3 sebesar 0,004, 0,005, dan 0,010 M serta pada variasi inhibitor 5;10, 15, dan 20 ppm dengan asap cair cangkang kelapa sawit pada variasi suhu pirolisis 300 °C, 400 °C, 500 °C. Endapan yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kerak menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

3.3.3.3. Penentuan Efektivitas Inhibitor terhadap Kerak MgCO_3 dengan Penambahan Inhibitor Asap Cair Cangkang Sawit Hasil Pirolisis pada Suhu Pirolisis 300, 400, dan 500 °C menggunakan Metode *Unseeded Experiment* dengan Kupon Logam

Larutan pertumbuhan disiapkan dengan melarutkan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,003 M dan NaHCO_3 0,003 M masing-masing ke dalam 1000 mL larutan inhibitor asap cair cangkang kelapa sawit berkonsentrasi 20 ppm dalam berbagai variasi suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C. Setiap larutan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 15 menit pada suhu 80 °C hingga homogen, kemudian kedua larutan dicampurkan dan diaduk kembali selama 15 pada suhu yang sama untuk memicu pembentukan kerak MgCO_3 . Larutan yang mengandung endapan MgCO_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 konsentrasi larutan pertumbuhan 0,010 M untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap pembentukan kerak MgCO_3 .

3.4. Analisis Data

Data yang diperoleh mencakup jumlah endapan dalam setiap konsentrasi larutan pertumbuhan terhadap variasi suhu pirolisis dari asap cair cangkang kelapa sawit. Setiap data akan diplot sebagai jumlah endapan pada masing-masing konsentrasi larutan pertumbuhan magnesium karbonat terhadap variasi suhu pirolisis cangkang kelapa sawit menggunakan *microsoft excel*. Nilai *slope* dari masing-masing grafik menunjukkan pertumbuhan kerak MgCO₃. Morfologi kerak MgCO₃, baik sebelum maupun setelah penambahan inhibitor, dianalisis menggunakan SEM. Perubahan ukuran partikel MgCO₃ sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis dengan PSA. Struktur kerak MgCO₃ sebelum dan setelah penambahan indikator dianalisis menggunakan XRD. Untuk mengetahui efektivitas inhibitor dalam menghambat laju pembentukan endapan MgCO₃ dapat menggunakan Persamaan 3 yang dikemukakan oleh Patel (1999). Sementara, rendemen asap cair cangkang kelapa sawit dihitung menggunakan dua pendekatan, yaitu basis basah (*wet basis*) dan basis kering (*dry basis*). Rendemen basis basah diperoleh dengan membagi volume asap cair yang dihasilkan (mL) dengan massa umpan basah cangkang kelapa sawit, kemudian dikalikan 100%, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 4. Sementara itu, rendemen basis kering dihitung dengan membagi volume asap cair (mL) dengan massa umpan kering, di mana massa umpan kering diperoleh dari hasil perkalian massa umpan basah dengan selisih satu dan nilai kadar air bahan, kemudian dikalikan 100%, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 5 (Wijaya *et al.*, 2019).

$$Efektivitas\ Inhibitor\ (\%) = 100\% \times \left(\frac{W_k - W_i}{W_k} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

W_k = Berat kerak pada kontrol

W_i = Berat kerak pada perlakuan

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

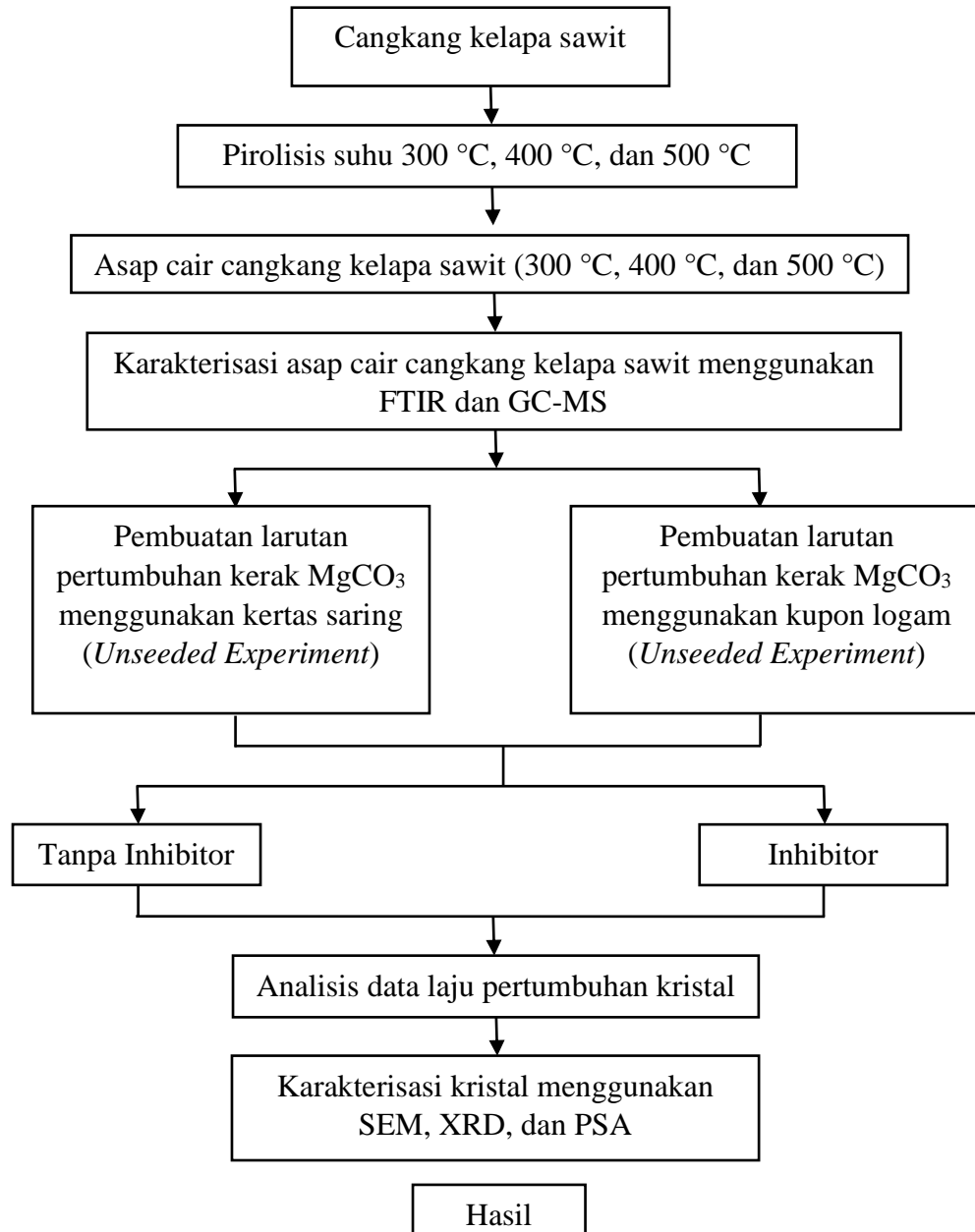
$$DB = \frac{\text{Volume asap cair (mL)}}{\text{Massa umpan kering (g)}} \times 100\% \dots (5)$$

$$\text{Massa umpan kering (g)} = \text{Massa umpan basah (g)} \times (1 - \text{kadar air}) \dots (6)$$

$$\text{Kadar air} = (\text{massa basah} - \text{massa kering}) \div \text{massa basah} \times 100\%$$

3.5. Diagram Alir

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 14



Gambar 14. Diagram alir penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

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

1. Asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis pada suhu 300 °C, 400 °C, dan 500 °C terbukti efektif sebagai inhibitor pembentukan kerak MgCO₃, dengan urutan efektivitas penghambatan dari tertinggi ke terendah adalah 400 °C > 500 °C > 300 °C.
2. Efektivitas penghambatan tertinggi diperoleh pada konsentrasi larutan pertumbuhan MgCO₃ 0,003 M dengan inhibitor asap cair hasil pirolisis 400 °C pada konsentrasi 20 ppm, yaitu sebesar 91,80% berdasarkan metode kertas saring dan 95,65% berdasarkan metode kupon logam.
3. Analisis SEM menunjukkan bahwa penambahan inhibitor mengubah morfologi kerak MgCO₃ dari permukaan padat berukuran besar menjadi kristal-kristal berukuran lebih kecil dengan variasi bentuk *sphere*, lempengan tipis, dan struktur berpori, yang mengindikasikan terjadinya gangguan pada proses pertumbuhan kerak di tingkat permukaan kristal.
4. Analisis XRD menunjukkan penurunan intensitas puncak difraksi setelah penambahan inhibitor, yang mengindikasikan terjadinya distorsi struktur kristal akibat interaksi senyawa aktif inhibitor dengan permukaan kerak. Fase kristal yang terbentuk tetap didominasi oleh hidromagnesit dan monoklinik, yang menunjukkan bahwa inhibitor tidak mengubah jenis fase kristal melainkan hanya memengaruhi keteraturan susunan kristalnya.
5. Analisis PSA menunjukkan bahwa penambahan inhibitor pada konsentrasi

20 ppm tidak menghasilkan perubahan signifikan terhadap ukuran partikel kerak MgCO_3 , dengan selisih nilai *mean* hanya 15,95 nm atau kurang dari 1% dan nilai *median* tetap sebesar 6.579,30 nm. Kondisi ini disebabkan oleh konsentrasi inhibitor yang sangat rendah sehingga partikel kerak berbentuk *sphere* yang terbentuk tetap dapat saling beragregasi, yang dikonfirmasi secara konsisten oleh hasil SEM dan XRD bahwa inhibitor bekerja efektif melalui perubahan morfologi dan keteraturan struktur kristal kerak, bukan melalui pergeseran ukuran partikel.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji efektivitas asap cair cangkang kelapa sawit hasil pirolisis 400 °C berdasarkan variasi *grade* (grade 1, grade 2, dan grade 3) guna mengetahui pengaruh perbedaan komposisi senyawa terhadap kemampuan penghambatan pembentukan kerak MgCO_3 . Pengujian dengan variasi jenis kerak lainnya juga disarankan dilakukan untuk mengetahui potensi asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor pada berbagai jenis sistem pembentukan kerak. Penentuan efektivitas inhibitor pada penelitian berikutnya disarankan menggunakan metode kupon logam, karena metode ini lebih merepresentasikan kondisi nyata pada sistem perpipaan industri dibandingkan metode kertas saring.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. 2018. Karakterisasi asap cair hasil pirolisis biomassa sebagai bahan pengawet alami. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Abidin, Z., Rahman, A., dan Pratama, D. 2021. Characterization of liquid smoke produced from biomass pyrolysis. *Journal of Biomass Conversion and Biorefinery*. 11(4): 1457–1466.
- Aditya, V. 2019. Pengaruh Penambahan Aditif 5 ppm Ion Cu^{2+} Terhadap Pertumbuhan Kerak Mg Pada Pipa Laminer Dengan Laju 30 mL/Menit. *TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*. 19(2): 76–86.
- Afrah, B.D., Riady, M.I., Arsadha, J.P., Rimadhina, R., Cundari, L., & 'Izzah, R.Z. (2024). Analysis of Liquid Smoke Grade Characteristics from Coconut Shells and Palm Kernel Shell Waste Through a Slow Pyrolysis Process. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(4), 545–558.
- Aisah, S. 2016. Efek Penambahan Ekstrak Gambir (*Uncaria gambir* Roxb), Kemenyan Putih (*Styrax benzoin* Dryand), dan Aditif Golongan Karboksilat Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Alahmad, M. 2008. Factors Affecting Scale Formation in Sea Water Environments: An Experimental Approach. *Chemical Engineering and Technology*. 31(1): 149–156.
- Al-Deffeeri, N. S. 2007. Heat Transfer Measurement as a Criterion for Performance Evaluation of Scale Inhibition in MSF Plants in Kuwait. *Desalination*. 204: 423–436.
- Al Gailani, A., Abdullah, M., dan Al-Jabri, H. 2024. Organic inhibitors containing carboxyl and hydroxyl groups for carbonate scale control. *Journal of Molecular Liquids*. 398: 124233.
- Al Nasser, W. N., 2020. Inline technique to evaluate the performance of scale inhibitors for calcium carbonate scale aggregation and prevention. *Chemical Engineering Research and Design*.

- Amjad, Z. 2013. *Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches*. Amsterdam: Elsevier.
- Ankona, E., Nisnevitch, M., Marks, V., Dorfman, O., Doroshev, A., & Anker, Y. 2023. Citrus pyrolysis temperature effect on wood vinegar characteristics. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101490.
- Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., dan Leslie, G. 2011. Scale Formation and Control in High Pressure Membrane Water Treatment Systems: A Review. *Journal of Membrane Science*. 383(1–2): 1–16.
- Aprian, R. D. 2022. Pengaruh Penggunaan Campuran Ekstrak Gambir dan Asap Cair Tempurung Kelapa Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$). *Tesis*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Asmawit dan Hidayati. 2016. Karakteristik Destilat Asap Cair Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Proses Redistilasi. *Majalah BIAM*. 12(2): 8–14.
- Asnawati. 2001. Pengaruh Temperatur Terhadap Reaksi Fosfonat dalam Inhibitor Kerak pada Sumur Minyak. *Jurnal Ilmu Dasar*. 2(1): 20-26
- Asih, S. B. 2019. Studi penambahan asap cair sabut kelapa sebagai inhibitor kerak kalsium karbonat ($CaCO_3$) menggunakan metode *unseeded experiment*. *Skripsi*. FMIPA, Universitas Lampung.
- Bancin, S. G., Utama, A. R. I., dan Darus, L. 2021. Pengaruh Variasi Waktu dan Jenis Limbah Padat Kelapa Sawit Pada Pirolisis Menjadi Asap Cair. *E-Proceeding of Engineering*. 8(5): 5819–5826.
- Basu, P. 2010. *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press. Elsevier. UK.
- Chen, Q., Hui, T., Sun, H., Peng, T., dan Ding, W. 2020. Synthesis of Magnesium Carbonate Hydrate from Natural Talc. *Open Chemistry*. 18(1): 951–961.
- Chen, Z., Świsłocka, R., Choińska, R., Marszałek, K., Dąbrowska, A., Lewandowski, W., & Lewandowska, H. 2024. Exploring the correlation between the molecular structure and biological activities of metal–phenolic compound complexes: Research and description of the role of metal ions in improving the antioxidant activities of phenolic compounds. *International Journal of Molecular Science*. 25(21): 11775.
- Choi, B. C. K., Tennessee, L. M., dan Eijkemans, G. J. M. 2001. Developing Regional Workplace Health and Hazard Surveillance in The Americas. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 10(6): 376–382.
- Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Johnson, A., dan King, G. 1999. Fighting Scale: Removal and Prevention. *Oilfield Review*. 11(3): 30–45.

- Darmapatni, K. A. G., Basori, A., dan Suanit, N. M. 2016. Pengembangan Metode GC-MS Untuk Penetapan Kadar Acetaminophen Pada Spesimen Rambut Manusia. *Jurnal Biosains Pascasarjana*. 18(3): 255–270.
- Deliephan, P., Wongkasemjit, S., dan Chaisuwan, T. 2023. Effect of Pyrolysis Temperature on the Composition of Biomass-Derived Liquid Smoke. *Renewable Energy*. 210: 118234.
- Dera, N. S. 2018. Pengaruh pH Larutan Terhadap Nukleasi dan Pertumbuhan Kristal Barium Sulfat di Dalam Pipa Beraliran Laminar. *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*. 1(2): 1–45.
- Dobberschutz, S., Nielsen, M. R., Sand, K. K., Stipp, S. L. S., dan Andersson, M. P. 2018. The Mechanisms of Crystal Growth Inhibition by Organic Additives. *Crystal Growth and Design*. 18(2): 817–828.
- Dong, M., Cheng, W., Li, Z., dan Demopoulos, G. P. 2008. Solubility and Stability of Nesquehonite ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$). *Journal of Chemical and Engineering Data*. 53(11): 2586–2593.
- Fachry, A. R., Tumanggor, J., dan Yuni, N. P. E. 2008. Pengaruh Waktu Kristalisasi dengan Proses Pendinginan terhadap Pertumbuhan Kristal Amonium Sulfat dari Larutannya. *Jurnal Teknik Kimia*. 15(2): 9-16.
- Farihah, A. 2025. Studi Penambahan Campuran Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit dan Ekstrak Daun Alpukat Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Sulfat ($CaSO_4$). *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Fatra, F., dan Suwignyo, J. 2020. Analisa Pengaruh Penambahan Asam Tartrat Terhadap Pembentukan Kerak di Dalam Pipa Pengeboran Minyak Bumi. *Journal of Automotive Technology Vocational Education*. 1(2): 1–8.
- Fakhreeva, A.V., Nosov, V.V., Voloshin, A.I., & Dokichev, V.A. 2023. Polysaccharides as Effective and Environmentally Friendly Inhibitors of Scale Deposition from Aqueous Solutions in Technological Processes. *Polymers*, 15(6), 1478.
- Fauziati, F., Priatni, A., dan Adiningsih, Y. 2018. Pengaruh Suhu Pirolisis Terhadap Karakteristik Asap Cair Cangkang Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. 17(2): 65–72.
- Feng, X., Li, Y., dan Zhang, H. 2024. Phenolic and Fatty Acid Compounds Derived from Biomass Pyrolysis and Their Functional Properties. *Renewable Energy*. 223: 120120.
- Firna Novari, F., Aryani, F., dan Arifin, S. 2014. Sifat Fisik dan Kimia Asap Cair dari Cangkang dan Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*. 1–8.
- Fitriani, F., Wildan, M. W., dan Rachman, R. A. 2024. Analisis Ukuran Partikel Nanosilica Pada Proses Alkali Fusion Silica Scaling Geotermal Dieng Menggunakan KOH. *Journal of Mechanical Engineering*. 1(1): 23–32.

- Gautier, Q., Berninger, N.-U., Roncal-Hrrero, T., Kroeger, R., Alloyeau, D., Mavromatis, V., Purgstaller, B., & Schott, J. 2016) Magnesium carbonate bearing minerals – macroscopic to nano scale experimental data and observations. *Goldschmidt Conference Abstracts*, Yokohama, Japan.
- Girard, J. P. 1992. *Smoking: Technology of Meat and Meat Products*. New York: Ellis Horwood.
- Gotama, B., dan Mahfud. 2015. Pengaruh Teknik Seeding terhadap Yield Kristal pada Kristalisasi Patchouli Alcohol dari Minyak Nilam. *Seminar Nasional Teknologi (SENATEK)*. 19
- Gu, T., Yang, C., Deng, S., Luukkanen, S., Yang, W., Long, T., & Wang, Z. 2024. Effect of environmentally friendly reverse osmosis scale inhibitors on inorganic calcium carbonate scale. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 702
- Haji, A. G. 2013. Komponen Kimia Asap Cair Hasil Pirolisis Limbah Padat Kelapa Sawit. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. 9(3): 109–116.
- Halim, R., Sari, P., dan Wibowo, A. 2006. Pengaruh Suhu Pirolisis Terhadap Komposisi Asap Cair Biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian*. 7(2): 95–101.
- Haji, A. G., Pari, G., Habibati, A., Amiruddin, dan Maulina. 2010. Kajian Mutu Arang Hasil Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit. *Jurnal Purifikasi*. 11(1): 77–86.
- Herman dan Rolly, I. 2018. Pengaruh Abu Cangkang Sawit Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Batubata. *Jurnal Pembangunan Nagari*. 3(1): 61–74.
- Husna, U. Z., Elraies, K. A., Shuhili, J. A. B. M., dan Elryes, A. A. 2022. The Utilization Potency of Biopolymer as Eco-Friendly Scale Inhibitors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 12(4): 1075–1094.
- Indrayani, Y., Oramahi, H. A., dan Nurhaida. 2011. Evaluasi Asap Cair Sebagai Bio-Termitisida Untuk Pengendalian Rayap Tanah *Coptotermes* sp. *Jurnal Tengkawang*. 1(2): 87–96.
- Kamal, D. F. 2023. Proses Demineralisasi Pada Unit Pengolahan Air di PT XYZ. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 3(1): 34–41.
- Kesuma, A. F. 2023. Studi Penambahan Campuran Limbah Cair Tempe dan Asap Cair Tempurung Kelapa Grade 2 sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*. *Skripsi*. Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Korchef, A. 2020. Kinetics of Carbonate Crystallization and Supersaturation Effects. *Crystal Research and Technology*. 55(9): 1900271.

- Lages, V. P., Gonçalves, R., Medeiros, F., Bisatto, R., Rossi, A. L., & Barreto Junior, A. G. 2025. Effect of scale inhibitors on the nucleation and crystallization of calcium carbonate. *Minerals*. 15(9): 947.
- Lestari, P. P., Sukmawati, Rizky, P., Silvany, R., Simanjuntak, D. S., & Ningrum, R. A. 2025. Optimasi waktu pembakaran pada pembuatan asap cair dari cangkang kelapa sawit. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*. 9(1):137-142.
- Lestari, D. E., dan Dibyo, S. 2003. *Kimia Air*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Li, Y., Wang, S., dan Zhao, H. 2021. Organic Inhibitors for Carbonate Scale Control: Adsorption and Nucleation Mechanisms. *Desalination*. 512: 115112. Ma, H., Chen, S., Zhao, S., Liu, X., dan Li, D. 2021. Corrosion Behavior of Copper in Acidic Solutions. *Journal of the Electrochemical Society*. 148(11): B482–B488.
- Li, C., Zhang, C., & Zhang, W. 2020. Experimental and theoretical studies of carboxylic polymers with low molecular weight as inhibitors for calcium carbonate scale. *Crystals*. 10(5): 406.
- Liu, Y., Kan, A. T., Tomson, M. B., & Zhang, P. 2022. Interactions of common scale inhibitors and formation mineral (calcium carbonate): Sorption and transportability investigations under equilibrium and dynamic conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 215: 110696.
- Lu, X., & Gu, X. 2022. A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 15(1): 106.
- Ma, Z., Chen, D., Gu, J., Bao, B., dan Zhang, Q. 2015. Determination of Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Palm Kernel Shell. *Energy Conversion and Management*. 89: 251–259.
- Maksimović, D., Petrović, M., dan Stojanović, M. 2025. Supersaturation Effects on Crystal Growth Kinetics of Carbonate Minerals. *Crystal Growth and Design*. 25(1): 156–165.
- 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): 1-8.
- Mangestiyono, W., Jamari, J., Bayuseno, A. P., & Muryanto, S. 2024. Development of $CaCO_3$ novel morphology through crystal lattice modification assisted by sulfate incorporation and vibration. *Communications in Science and Technology*. 9(1): 192–198.
- Margareta, M. A. H., & 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.

- Maulina, S., Nurtahara, N., dan Fakhradila, F. 2018. Pirolisis Pelepah Kelapa Sawit untuk Menghasilkan Fenol pada Asap Cair. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 7(2): 15–20.
- Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., dan Rahman, M. A. 2017. *Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy*. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia.
- Morse, J. W., Arvidson, R. S., dan Lüttge, A. 2007. Calcium Carbonate Formation and Dissolution. *Chemical Reviews*. 107(2): 342–381.
- Mufrodi, S., Megaprastio, B., Winarno, J., dan Saputro, M. A. 2021. Produksi Bahan Bakar Alternatif dari Pirolisis Plastik. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian*. 317–327.
- Muhammad, F. 2019. Studi Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa Grade 2 Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat. *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Muryanto, S., Bayuseno, A. P., Jamari, dan Sari, D. P. 2020. Influence of Organic Compounds on Magnesium Carbonate Crystallization. *Indonesian Journal of Chemistry*. 20(2): 298–307.
- Muslimah, M. C. 2023. Studi Penambahan Campuran Ekstrak Kulit Nanas (*Ananas comosus*) dan Asap Cair Tempurung Kelapa Grade 2 sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*. *Skripsi*. Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Nagy, Z. K., and Braatz, R. D. 2012. Advances and new directions in crystallization control. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 3(1): 55-75.
- Novita, S. A., Santosa, Nofialdi, Andasuryani, & Fudholi, A. 2021. *Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa*. *Agroteknika*. 4(1): 53–67.
- Nugraha, A. 2024. Pengaruh pH terhadap Presipitasi Mineral Karbonat dalam Sistem Larutan Magnesium. *Jurnal Kimia Lingkungan*. 12(1): 45–53.
- Oramahi, H. A., Wardoyo, E. R. P., dan Kustiati, K. 2021. Penggunaan Asap Cair dari Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Pengendalian Jamur *Phytophthora Citrophthora* Secara In Vitro. *Majalah Ilmiah Biologi BIOSFERA: A Scientific Journal*. 38(1): 34-38.
- Perwitasari, D. S., Santi, S. S., Pangestu, M. A., dan Yahya, A. 2022. The Effect of Stirrer Rotation on Crystallization of Struvite. *International Journal of Mechanical Engineering*. 7(1): 1–4.
- Pratama, A. S. C., dan Sa'diyah, K. 2023. Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Asap Cair Melalui Metode Pirolisis. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 8(1): 36–44.

- Putri, D., Rahmawati, F., dan Kurniawan, A. 2024. Effect of pH on Carbonate Precipitation in Aqueous Systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12(1): 110245.
- Qian, H., Zhu, Y., Wang, H., Song, H., Wang, C., Liu, Z., & Li, H. 2020. Anti-scaling of superhydrophobic poly(vinylidene fluoride) composite coating: Tackling effect of carbon nanotubes. *Progress in Organic Coatings*. 142: 105566
- Raharjo, S. 2020. *Pembentukan dan Pengendalian Kerak Mineral di Dalam Pipa*. Semarang: Universitas Muhammadiyah Semarang.
- Rahmadyo, N. A., Dini, C., dan Samsudi, R. 2017. Perbandingan Analisa Kinetika Reaksi Pembentukan Kerak CaCO₃ menggunakan Persamaan Arrhenius dan Analisa Differensial Scanning Calorimetry (DSC). *Prosiding Seminar Nasional Publikasi Hasil-Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*. 64 71.
- Rahmawati, D. I., dan Nuraliyah, A. 2024. Pengaruh Ketahanan Korosi Logam Aluminium Terhadap Variasi Larutan Asam. *DYNAMES*. 1(1): 15–28.
- Ratnawati, R., dan Hartanto, S. 2010. Pengaruh Inhibitor Organik terhadap Pembentukan Kerak Karbonat pada Sistem Air Industri. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*. 12(1): 27–33.
- Ridhuan, K., Irawan, D., dan Inthifawzi, R. 2019. Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair. *TURBO*. 8(1): 69–79.
- Rigling, M., Höckmeier, L., Leible, M., Herrmann, K., Gibis, M., Weiss, J., & Zhang, Y. 2023. Characterization of the Aroma Profile of Food Smoke at Controllable Pyrolysis Temperatures. *Separations*, 10(3), 176.
- Ruiz, P. S., Dang, Q., & Lyu, G. 2022. Study on the staged and direct fast pyrolysis behavior of waste pine sawdust using high heating rate TG-FTIR and Py-GC/MS. *ACS Omega*, 7(8), 6936–6948.
- Salimin, Z., dan Gunandjar. 2006. Penggunaan EDTA sebagai Pencegah Timbulnya Kerak pada Evaporasi Limbah Radioaktif Cair. *Prosiding PTLR*. 1–8.
- Sari, R. P. 2011. Studi Penanggulangan Problem Scale Dari Near-Wellbore Hingga Flowline Di Lapangan Minyak Limau Skripsi. Fakultas Teknik Program Ekstensi Teknik Kimia Universitas Indonesia. Depok.
- Sari, N. 2018. Aktivitas Antimikroba dan Antioksidan Senyawa Fenolat dalam Asap Cair Biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian*. 19(1): 33–41.
- Sarwendah, M., Santoso, H., dan Wibowo, A. 2019. Chemical Characterization of Palm Shell Liquid Smoke Using GC-MS. *Indonesian Journal of Applied Chemistry*. 21(3): 135–142.
- Septiano, A. F., Susilo, dan Setyaningsih, N. E. 2021. Analisis Citra SEM-EDX Komposit Resin Timbal. *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*. 44(2): 81–86.

- Setiososari, E. 2018. Studi Penggunaan Asap Cair Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat. *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Setyaningsih, N. E., Susilo, & Septiano, A. F. 2021. Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal Dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*. 44(2): 81–86.
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Borhani, T. N., Guo, M., Konda, N. V. S. N. M., Cortada Garcia, M., Wang, L., Hallett, J., & Shah, N. 2019. Review of the state of art and future research directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (104):305–352.
- Sihombing, R. E. 2025. Studi penambahan campuran ekstrak daun alpukat (*Persea americana* Mill) dan asap cair cangkang kelapa sawit sebagai inhibitor kerak magnesium karbonat ($MgCO_3$). *Skripsi*. Universitas Lampung. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Lampung.
- Simangunsong, F. M. P., Mulyani, S., dan Hartiati, A. 2018. Evaluasi Karakteristik Krim Ekstrak Kunyit. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*. 6(1): 11–21.
- Sopyan, I. 2020. *Kokristalisasi: Modifikasi Padatan Farmasi sebagai Strategi Perbaikan Sifat Fisikokimia Obat*. Yogyakarta: Deepublish.
- Stopic, S., Dertmann, C., Koiwa, I., Kremer, D., Wotruba, H., Etzold, S., Telle, R., Knops, P., dan Friedrich, B. 2019. Synthesis of Nanosilica via Olivine Mineral Carbonation. *Metals*. 9: 1–13.
- Sudarmaji, A. T., dan Saroso, H. 2021. Pengaruh Penambahan Larutan $Ca(OH)_2$ terhadap Pembentukan Kerak pada Penguapan Nira Tebu. *Distilat*. 7(2): 634–641.
- Suharso, Buhani, and Aprilia, L. 2014. Influence of Calix [4]arene Derived Compound on Calcium Sulphate Scale Formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26(18): 6155.
- Suharso, S., dan Buhani, B. 2015. *Kimia Kristalisasi dan Pengendalian Kerak Mineral*. Bandar Lampung: Universitas Lampung Press.
- Suharso, S., Buhani, B., dan Suharjo, S. 2017. Mechanism of Carbonate Scale Inhibition by Organic Inhibitors. *Journal of Water Process Engineering*. 18: 84–91.
- Suharso, S., Buhani, B., Utari, H. R., Tugiyono, T., & Suharso, H. S. 2019. Influence of Gambier Extract Modification as an Inhibitor of Calcium Sulfate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 22–28.
- Suharso dan Buhani. 2019. *Penghambat Kerak Ramah Lingkungan*. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat. Universitas Lampung
- Suharso, Setiososari, E., Kiswandono, A. A., Buhani, and Satria, H. 2019. Aplikasi LS sebagai Green Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium

- Karbonat (CaCO_3). *Talenta Conference Series: Science and Technology (ST)*. 2(2): 3-9.
- Suharso, S., Aprian, R. D., Kiswandono, A. A., Buhani, B., & Tugiono, T. 2025. Application of gambier concentrate and coconut shell smoke condensate as eco-friendly inhibitors against magnesium carbonate precipitation. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*. 5(3): 897–912.
- Susilowati, S., Aqil, U., Wibowo, H. G., dan Karaman, N. 2024. Pengaruh Pengadukan dan Konsentrasi ZnCl_2 pada Pembentukan Kristal Barium Sulfat. *Inovasi Teknik Kimia*. 9(2): 92–97.
- Syahri, M., dan Sugiarto, B. 2008. Scale Treatment pada Pipa Distribusi Crude Oil Secara Kimiawi. *Prosiding Seminar Nasional Teknoin*. B-33–B-38.
- Tamrin, T. 2022. Karakterisasi Produk Pirolisis Biomassa Lignoselulosa sebagai Sumber Senyawa Fenolik. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 23(1): 55–63.
- Toroz, D., Song, F., Uddin, A., Chass, G. A., & Di Tommaso, D. 2022. A database of solution additives promoting Mg^{2+} dehydration and the onset of MgCO_3 nucleation. *Crystal Growth & Design*. 22(5): 3080–3089.
- Valiakhmetova, A., Sorbie, K. S., Boak, L. S., and Shaw, S. S. 2017. Solubility and Inhibition Efficiency of Phosphonate Scale Inhibitor Calcium Magnesium Complexes for Application in a Precipitation-Squeeze Treatment. *SPE Production and Operations*. 32(3): 343-350.
- Varol, E., and Mutlu, Ü. 2023. TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies*. 16(9), 3674.
- Varol, M., and Mutlu, I. 2023. Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: Chemical Composition and Functional Group Analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13(6): 5481–5492.
- Varma, A. K., Shankar, R., & Mondal, P. 2018. A review on pyrolysis of biomass and the impacts of operating conditions on product yield, quality, and upgradation. Dalam P. K. Sarangi, S. Nanda, & P. Mohanty (Eds.), *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization*. 227-229. Springer Singapore.
- Wahyuni, I., dan Fathoni, R. 2019. Pembuatan Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit. *Journal Chemurgy*. 3(1): 11–15.
- Wang, R., Wang, G., Yan, Y., Sabeghi, M., Ming, Z., Allen, J. K., dan Mistree, F. 2019. Ontology-Based Representation of Meta-Design in Designing Decision Workflows. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 19(1): 1–20.
- Wang, Y., Moo, Y. X., Chen, C., Gunawan, P., dan Xu, R. 2010. Fast Precipitation of Uniform CaCO_3 Nanospheres. *Journal of Colloid and Interface Science*. 352: 393–400.

- Weremeichik, J. M., Gabitov, R. I., Sadekov, A., Novak, A., Jimenez, A., Thirumalai, R. V. K. G., Varco, J. J., & Dygert, A. 2021. Mg/Ca ratios in synthetic low-magnesium calcite: An experimental investigation. *Minerals*. 11(11); 1158
- Whitten, K. W., Davis, R. E., Peck, M. L., and Stanley, G. G. 2014 . *Chemistry. 10th Edition*. Mary Finch. USA.
- Wijaya, M., Wiharto, M., & Auliah, A. 2019. Dekomposisi termal pirolisis terhadap rendemen dan komposisi senyawa kimia dalam asap cair kulit buah kakao. *JC-T Journal Cis-Trans*. 3(2): 18–24.
- Widyastuti, N. L., dan Nugroho, H. 2020. Dampak Covid-19 terhadap Industri Minyak dan Gas Bumi di Indonesia. *Indonesian Journal of Development Planning*. 4(2): 166–177.
- Yulistiani, R. 2008. *Asap Cair sebagai Bahan Pengawet alami pada Produk Daging dan Ikan*. Surabaya: UPN Veteran Jawa Timur.
- Zafira, N. A. 2023. Studi Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa *Food Grade* (Grade 2) sebagai Inhibitor Kerak Magnesium Karbonat ($MgCO_3$) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*. Skripsi. Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Zhang, C., Ho, S. H., Peng, J., & Li, S. 2022. A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 15, 1–22.
- Zhao, B., Zhang, Y., Sun, Q., Lv, X., Xu, J., & Chen, G. 2024. Optimizing biochar production: A review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Frontiers in Agricultural Science and Engineering*, 11(4), 597
- Zuo, Z.S., Yang, W.Z., Zhang, K.G., et al. 2020. Effect of scale inhibitors on the structure and morphology of $CaCO_3$ crystal electrochemically deposited on TA1 alloy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 562, 558–566.