

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM FOSFAT ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) MENGGUNAKAN
METODE *UNSEEDED EXPERIMENT***

(Skripsi)

Oleh

**TEGAR PUTRA ARRASYID
NPM 2217011006**



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

ABSTRAK

STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR KERAK KALSIMUM FOSFAT ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) MENGGUNAKAN METODE *UNSEEDED EXPERIMENT*

Oleh

TEGAR PUTRA ARRASYID

Pembentukan kerak kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) merupakan masalah serius pada industri minyak dan gas, desalinasi, serta ketel uap karena dapat menurunkan efisiensi dan merusak peralatan. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi suhu pirolisis (300, 400, dan 500 °C) asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ serta menentukan suhu pirolisis yang menghasilkan inhibitor paling efektif.

Penelitian ini menggunakan metode *unseeded experiment* dengan konsentrasi larutan pertumbuhan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yaitu 0,0003; 0,0004; 0,0005; dan 0,0010 M serta variasi konsentrasi inhibitor 5; 10; 15; dan 20 ppm. Pembuktian lebih lanjut dilakukan melalui pengujian pada kupon logam pada konsentrasi larutan 0,0003 M dan 0,0010 M dengan penambahan inhibitor 20 ppm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai efektivitas inhibisi tertinggi diperoleh asap cair dengan suhu pirolisis 400 °C sebesar 94,12%, pada konsentrasi larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0003 M dengan penambahan inhibitor 20 ppm, dengan urutan efektivitas 400 °C > 300 °C > 500 °C. Pengujian kupon logam memperkuat hasil tersebut dengan efektivitas sebesar 95,45%. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa penambahan inhibitor menyebabkan agregat partikel menjadi lebih renggang dan tidak menyatu. Analisis *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan peningkatan nilai *Polydispersity Index* (PDI) dari 0,460 tanpa inhibitor menjadi 0,665 dengan inhibitor yang mengindikasikan distribusi ukuran partikel menjadi lebih heterogen. Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan fase hidroksiapatit monoklinik tanpa inhibitor berubah menjadi heksagonal dengan inhibitor, yang mengindikasikan perubahan keteraturan struktur kristal.

Kata kunci: inhibitor, kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, asap cair, pirolisis, tempurung kelapa

ABSTRACT

STUDY ON THE EFFECT OF HEATING TEMPERATURE IN THE PYROLYSIS PROCESS OF LIQUID SMOKE FROM COCONUT SHELL AS AN INHIBITOR OF CALCIUM PHOSPHATE ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) SCALE USING THE *UNSEEDED EXPERIMENT* METHOD

By

TEGAR PUTRA ARRASYID

The formation of calcium phosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) scale is a serious problem in the oil and gas, desalination, and boiler industries because it can reduce efficiency and damage equipment. This study aimed to investigate the effect of pyrolysis temperature variations (300, 400, and 500 °C) of coconut shell liquid smoke as a $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ scale inhibitor and to determine the pyrolysis temperature that produces the most effective inhibitor. This study employed the unseeded experiment method using $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ growth solution concentrations of 0.0003, 0.0004, 0.0005, and 0.0010 M, with inhibitor concentrations of 5, 10, 15, and 20 ppm. Further verification was carried out using metal coupon tests at solution concentrations of 0.0003 M and 0.0010 M with the addition of 20 ppm inhibitor. The results showed that the highest inhibition efficiency was obtained from liquid smoke produced at a pyrolysis temperature of 400 °C, reaching 94.12% at a $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ solution concentration of 0.0003 M with the addition of 20 ppm inhibitor, with the effectiveness order of 400 °C > 300 °C > 500 °C. Metal coupon testing further confirmed these results with an inhibition efficiency of 95.45%. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis showed that the addition of inhibitor caused the particle aggregates to become more loosely packed and less agglomerated. Particle Size Analyzer (PSA) analysis showed an increase in the Polydispersity Index (PDI) value from 0.460 without inhibitor to 0.665 with inhibitor, indicating that the particle size distribution became more heterogeneous. X-Ray Diffraction (XRD) analysis showed that the monoclinic hydroxyapatite phase without inhibitor transformed into a hexagonal phase after inhibitor addition, indicating changes in the crystal structure ordering.

Keywords: inhibitor, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ scale, liquid smoke, pyrolysis, coconut shell

**STUDI PENGARUH SUHU PEMANASAN PADA PROSES PIROLISIS
ASAP CAIR DARI TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI INHIBITOR
KERAK KALSIUM FOSFAT ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) MENGGUNAKAN METODE
*UNSEEDED EXPERIMENT***

Oleh

TEGAR PUTRA ARRASYID

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 TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI
INHIBITOR KERAK KALSIMUM FOSFAT
($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) MENGGUNAKAN METODE
UNSEEDED EXPERIMENT**

Nama Mahasiswa : **Tegar Putra Arrasyid**

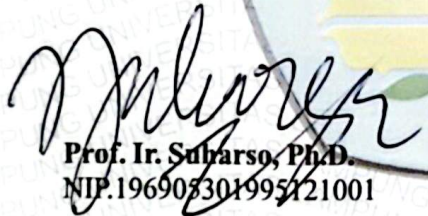
Nomor Pokok Mahasiswa : **2217011006**

Program Studi : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing


Prof. Ir. Suharso, Ph.D.
NIP.196903301995121001


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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

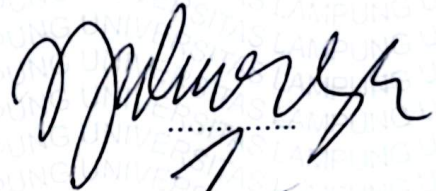

Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP.197203302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Ir. Suharso, Ph.D.



Sekretaris

: Prof. Dr. Buhani, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dian Septiani Pratama, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 24 Juni 2026

**SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Tegar Putra Arrasyid
Nomor Pokok Mahasiswa	: 2217011006
Program Studi	: Kimia
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi	: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul “Studi Pengaruh Suhu Pemanasan pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Tempurung Kelapa sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) menggunakan Metode *Unseeded Experiment*” adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, metode, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya, saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan dan sepanjang nama saya disebutkan.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026
Menyatakan



Tegar Putra Arrasyid
NPM 2217011006

RIWAYAT HIDUP



Tegar Putra Arrasyid, dilahirkan di Tangerang pada tanggal 4 Januari 2004 sebagai anak ketiga dari pasangan Bapak Ahmad Rosidi dan Ibu Sri Yanti. Penulis menyelesaikan pendidikan di TK El-Rasied yang diselesaikan pada tahun 2010. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di SD Negeri 3 Balaraja hingga lulus tahun 2016, SMP Negeri 1 Balaraja hingga lulus tahun 2019, dan SMA Negeri 1 Kabupaten Tangerang hingga lulus pada tahun 2022. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa studi, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) FMIPA Unila, yaitu sebagai anggota bidang pada periode 2023 dan sebagai Ketua Bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia (SPIK) pada periode 2024, Anggota Bidang Sosial Masyarakat (Sosmas) Himpunan Mahasiswa Banten (HMB) periode 2025-2026. Selain organisasi, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Anorganik II pada tahun 2025.

Sebagai bentuk aplikasi ilmu pengetahuan dan penerapan Tri Dharma Perguruan Tinggi, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sukarame II, Kecamatan Teluk Betung Barat, Bandar Lampung pada Juli - Agustus 2025. Penulis juga telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT PLN Nusantara Power UPK Sebalang dengan judul laporan "*Pengaruh Berat Batubara pada Proses Air Dry Loss (ADL) Terhadap Laju Pengeringan Batubara pada Parameter Sulfur*". Selain itu, penulis juga melaksanakan penelitian untuk

menyusun skripsi dengan judul. “Pengaruh Suhu Pemanasan pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Tempurung Kelapa sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”.

MOTTO HIDUP

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.”

(QS. Al-Inshirah: 5)

“Sesungguhnya Allah tidak menyia-nyiakan pahala orang yang melakukan perbuatannya dengan baik.”

(QS. Al-Kahfi: 30)

"Amalan yang paling dicintai Allah adalah amalan yang dilakukan secara terus-menerus meskipun sedikit."

(HR. Bukhari dan Muslim)

"Jadilah mata air yang jernih, yang memberikan kehidupan kepada sekitarmu."

(B.J. Habibie)

"Tetaplah rendah hati; pada akhirnya kita hanyalah sekumpulan atom yang diberi kesempatan untuk terus belajar, berkarya, dan memberi manfaat."

(Tegar Putra Arrasyid)

PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur kehadiran Allah *Subhanallahu Wa Ta'ala* atas segala anugerah, nikmat, kesehatan, kemudahan, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Tiada lembar yang lebih indah dalam karya ini selain lembar persembahan. Dengan mengucapkan *Bismillahirrahmanirrahim*, penuh rasa syukur dan bangga, karya sederhana ini penulis persembahkan sebagai bentuk bakti, tanggung jawab, dan ungkapan terima kasih kepada:

Keluarga Tersayang

Terima kasih atas segala pengorbanan dan dukungan yang tiada henti, serta cinta yang tiada batas. Terima kasih atas kerja keras, perjuangan, keridaan, semangat, perhatian, serta doa yang senantiasa dipanjatkan dalam setiap sujud, sehingga menghantarkan saya hingga mampu mencapai titik ini. Semua kebaikan dan kasih sayang tersebut mungkin tidak akan pernah dapat terbalaskan hanya melalui selembar kertas bertuliskan kata persembahan ini.

Rasa hormat saya kepada:

Prof. Ir. Suharso, Ph.D.

Prof. Dr. Buhani, M.Si.

Terima kasih atas bimbingan, ilmu, nasihat, dan kesabaran dalam membimbing selama ini.

Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia

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

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

Serta

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Alhamdulillah rabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan kekuatan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Suhu Pemanasan pada Proses Pirolisis Asap Cair dari Tempurung Kelapa sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*”**.

Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada teladan kita, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabatnya.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyusunan karya ini tidak terlepas dari bantuan, doa, serta dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Prof. Ir. Suharso, Ph.D., selaku Dosen pembimbing I, atas bimbingan, kebaikan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan sampai dengan penyelesaian skripsi ini.
2. Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku Dosen Pembimbing II atas kebaikan, ketekunan, ketelitian, bimbingan, arahan, masukan dan ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses penyelesaian skripsi.
3. Ibu Dian Septiani Pratama, M.Si., selaku Dosen Pembahas, atas motivasi, saran, serta masukan yang membangun dalam proses penyelesaian skripsi.

4. Prof. Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc., selaku Pembimbing Akademik atas segala kebaikan, nasihat, dan motivasi yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., sebagai Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan pendidikan di kampus.
8. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat FMIPA, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi hingga dapat terselesaikan.
9. Bapak Rahmat Martin Pranata S.Tr.T. selaku pembimbing lapangan yang telah membimbing dan menerima penulis dengan baik, serta Bapak Hadi, Bang Adhib, Kak Nanda, Kak Rio, Bang Dedi, Bang Nanda, Kak Feri, Kak Rudi, Kak Fadli yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama pelaksanaan Praktik Kerja lapangan di PLN Nusantara Power UP Sebalang.
10. Teristimewa dan terutama, penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada Bapak Ahmad Rosidi dan Ibu Sri Yanti. Terima kasih atas segala doa, cinta, kasih sayang, dan dukungan yang telah diberikan selama ini, serta segala perjuangan dan pengorbanan yang tidak pernah berhenti, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
11. Kepada kakak-kakakku tersayang, Teh Icha dan Teh Kiky, serta adikku Syathir, terima kasih atas segala doa, dukungan, perhatian, pengorbanan, dan semangat yang selalu diberikan. Terima kasih telah menjadi alasan penulis untuk terus kuat dan bertahan dalam setiap proses. Terima kasih telah membantu mewujudkan impian penulis menjadi seorang sarjana. Semua perjuangan, ketulusan, dan kasih sayang yang kalian berikan akan selalu menjadi hal berharga dalam hidup penulis. Semoga Allah Subhanallahu Wa

Ta'ala senantiasa memberikan kesehatan, kebahagiaan, dan keberkahan untuk kita semua.

12. Kepada orang tersayang dengan NPM 2217011090, terima kasih atas dukungan, perhatian, doa, dan semangat yang senantiasa diberikan. Terima kasih telah hadir dan menjadi bagian dari perjalanan penulis selama masa perkuliahan, menemani dalam berbagai keadaan, serta memberikan motivasi di saat penulis merasa lelah dan kehilangan semangat. Kesabaran, pengertian, dan ketulusanmu sangat berarti bagi penulis serta menjadi penyemangat hingga skripsi ini terselesaikan. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan terbaik, serta semoga apa yang sedang kita perjuangkan dapat terwujud di masa yang akan datang.
13. Kepada sahabat-sahabat masa SMA, khususnya anggota Grup Lawak Badut Farras Sahil Mumtaz, Hamzah Naufal Zuhdi, Muhamad Dafa Fauzi, Ridho Ulhaq, Zacky Ramadan Syach, Ahmad Muhaimin Majid, dan Muhammad Hafidzh Dzikri, terima kasih telah menjadi lingkungan yang suportif dan selalu memberikan dukungan di tengah kesibukan penulis menempuh studi. Terima kasih atas kebersamaan yang tetap terjaga dan semangat yang selalu diberikan setiap kali penulis kembali ke kampung halaman. Kehadiran kalian senantiasa memberikan energi positif bagi penulis untuk dapat menyelesaikan masa perkuliahan ini dengan baik.
14. Teruntuk teman-teman terbaik semasa kuliah, khususnya teman-teman di *Reminder Tugas*, terima kasih atas kebersamaan yang senantiasa menemani penulis dalam setiap proses, memberikan semangat serta dukungan dari awal perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi ini. Semoga Allah permudah setiap langkah kita menuju kesuksesan.
15. Teruntuk teman seperantauan sedari SMA, Thia Noviyanti dan Fajri Ian Herlika. Terima kasih telah mendampingi penulis di suka maupun duka selama merantau. Semangat dan segala bentuk dukungan yang kalian berikan membuatku merasa tenang dan tidak sendirian dalam berjuang di perantauan. Tetap semangat untuk kita semua, mari kita tuntaskan apa yang telah kita mulai di sini, dan pulanglah bersama sebagaimana kita datang bersama.

16. Kepada teman-teman masa SMP, khususnya teman-teman *Scout* Nepati, terima kasih atas dukungan, serta kebersamaan yang telah terjalin hingga saat ini. Berbagai pengalaman, cerita, dan kenangan yang telah dibagikan menjadi sumber semangat dan motivasi bagi penulis dalam menjalani masa perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini.
17. Kepada keluarga besar MPK dan OSIS, khususnya teman-teman Baret Biru 21, terima kasih atas kebersamaan, pengalaman, dan kenangan yang telah diberikan selama masa sekolah. Penulis juga bersyukur karena silaturahmi dan hubungan baik yang terjalin masih tetap terjaga hingga saat ini. Dukungan, perhatian, serta semangat yang diberikan menjadi salah satu motivasi bagi penulis dalam menjalani proses perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini.
18. Teman-teman KKN, Suwaibith Emayo, M Raka Ardiansyah, Ghesya Adinda Yulia Fitrih, Yoshi Luthfiah Irya, Dina Prita Olivia, Murni Cania Makdalena Simamora, Eka Nopiyana, dan Vina Pandu Winata, terima kasih atas kebersamaan, kerja sama, dukungan, serta pengalaman berharga yang telah dilalui bersama selama pelaksanaan Kuliah Kerja Nyata. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan penulis dalam belajar, beradaptasi, dan mengabdikan kepada masyarakat. Segala cerita, perjuangan, dan kenangan yang telah dilewati bersama akan selalu menjadi pengalaman yang berharga dan tidak terlupakan.
19. Teman-teman seperjuangan penelitian, Khansa Fathrizkiya Julisa, Agung Hasintongan Parulian Hasibuan, Widia Oktavani Br Tarigan, Yenaly Fitriana, Kadek Wendi Septiani, dan Triyana Bunga Diyan Sari, terima kasih atas kebersamaan, bantuan, dukungan, kerja sama, serta semangat yang telah diberikan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi tempat berbagi ilmu, cerita, dan perjuangan dalam menghadapi berbagai tantangan selama proses penelitian berlangsung. Semoga segala pengalaman dan kenangan yang telah dilalui bersama dapat menjadi hal yang berharga dan membawa kebaikan di masa mendatang.
20. Kepada teman-teman pimpinan HIMAKI periode 2024, terima kasih atas kesempatan, kepercayaan, serta pengalaman berorganisasi yang telah diberikan. Berbagai proses yang dilalui bersama menjadi sarana pembelajaran

yang berharga dalam mengembangkan kemampuan, memperluas relasi, serta membentuk karakter dan jiwa kepemimpinan penulis selama masa perkuliahan.

21. Kepada Bidang SPIK Periode 2024, khususnya abid-abid, terima kasih atas dukungan, doa, dan semangat yang diberikan selama ini. Terima kasih sudah selalu ada dan menjadi teman berbagi di setiap proses. Kebersamaan dengan kalian sangat berarti bagi penulis. Semoga silaturahmi kita tetap terjaga dan kita semua selalu diberikan kebaikan serta keberkahan.
22. Teman-teman pulang, Fiqri Fauzan Hadi, Hanun Lunar Pradaka, Citra Dwi Ayuningtias, Nishfa Laila Maghfiroh, Nurul Rismawati, dan Suci Fitria Insani, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, dan persahabatan yang telah terjalin selama masa perkuliahan. Terima kasih telah menemani setiap perjalanan pulang menuju Banten dan berbagi banyak cerita, tawa, serta pengalaman yang membuat masa perkuliahan menjadi lebih bermakna. Semoga segala kenangan yang telah kita lalui bersama selalu menjadi cerita indah yang akan dikenang.
23. Keluarga Besar kimia Angkatan 2022 dan teman-teman kelas C yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas segala kebersamaan dalam menjalani perkuliahan di kampus dari awal perkuliahan sampai sekarang.
24. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang senantiasa membantu dalam kelancaran sistem akademik, penelitian, penyusunan skripsi, dan selama penulis menjalani perkuliahan di jurusan Kimia FMIPA Unila. Terima kasih atas segala bantuan dan arahan yang telah diberikan.
25. Terakhir, terima kasih kepada diri penulis sendiri, atas segala bentuk kerja keras, ketangguhan, dan kesabaran yang telah dikerahkan hingga saat ini. Terima kasih untuk telah memilih tidak menyerah, bersedia berjuang di tengah segala keraguan, serta mampu menuntaskan tanggung jawab besar ini dengan sebaik-baiknya. Skripsi ini adalah wujud nyata dari proses pendewasaan dan keteguhan yang telah penulis lalui.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026

Tegar Putra Arrasyid

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik	5
2.2. Kerak	6
2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak	8
2.4. Faktor Pembentukan Kerak	12
2.5. Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	15
2.6. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak	16
2.7. Asap Cair Tempurung Kelapa	19
2.7.1. Proses Pirolisis	20
2.7.2. Kandungan Asap Cair Tempurung Kelapa	24
2.8. Metode <i>Unseeded Experiment</i>	27
2.9. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Fosfat	27
2.9.1. Spektrofotometri <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	28
2.9.2. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	30
2.9.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	31
2.9.4. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	33
2.9.5. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	34
III. METODOLOGI PENELITIAN	36
3.1. Waktu dan Tempat	36
3.2. Alat dan Bahan	36
3.3. Prosedur Penelitian	37
3.3.1. Pembuatan Asap Cair	37
3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa	37

3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	38
3.3.3.1. Penentuan Laju Pertumbuhan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Unseeded Experiment</i> ...	38
3.3.3.2. Penentuan Efektivitas Inhibitor Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode <i>Unseeded Experiment</i>	39
3.3.3.3. Pengujian Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada Sistem dengan Laju Alir	40
3.3.4. Analisis Data	41
3.3.5. Diagram Alir Penelitian	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Pengaruh Suhu Pirolisis terhadap Produksi Asap Cair Tempurung Kelapa dan Konsumsi Gas	43
4.1.1. Pirolisis pada Suhu 300 °C	45
4.1.2. Pirolisis pada Suhu 400 °C	46
4.1.3. Pirolisis pada Suhu 500 °C	47
4.1.4. Perbandingan Konsumsi Gas dan Produktivitas Antar Suhu ...	48
4.2. Uji Ketahanan	49
4.3. Analisis Gugus Fungsi Asap Cair Tempurung Kelapa Menggunakan <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	51
4.4. Analisis Inhibitor Menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	54
4.4.1. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 300 °C	54
4.4.2. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 400 °C	57
4.4.3. Analisis Komponen Senyawa Kimia Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 500 °C	59
4.5. Karakteristik pH Asap Cair Tempurung Kelapa	66
4.6. Penentuan Pertumbuhan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dengan Metode <i>Unseeded Experiment</i>	67
4.7. Penentuan Efektivitas Inhibitor Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dengan Metode <i>Unseeded Experiment</i>	69
4.7.1. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 300 °C	69
4.7.2. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 400 °C	71
4.7.3. Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa Hasil Pirolisis pada Suhu 500 °C	72
4.8. Pengaruh pH Larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ terhadap Efektivitas Inhibitor	74
4.9. Analisis Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa terhadap Pembentukan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada Kupon Logam	76
4.9.1. Kupon Logam pada Konsentrasi Larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0003 M	76
4.9.2. Kupon Logam pada Konsentrasi Larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0010 M	78

4.10. Perbandingan Efektivitas Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa pada Berbagai Suhu Pirolisis	80
4.11. Analisis Kalsium Fosfat $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	81
4.12. Analisis Permukaan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	84
4.13. Analisis Distribusi Ukuran Partikel Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Menggunakan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	85
4.14. Analisis Struktur Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	87
4.15. Model Penghambatan Kerak oleh Inhibitor	89
V. SIMPULAN DAN SARAN	91
5.1. Simpulan.....	91
5.2. Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA.....	93
LAMPIRAN	101

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi kimia tempurung kelapa.....	25
2. pH dari asap cair komersial dan tempurung kelapa	26
3. Kandungan asap cair tempurung kelapa serta titik didihnya	27
4. Kelompok spesifik dan rentang panjang gelombang FTIR.....	29
5. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 300 °C	45
6. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 400 °C	46
7. Data hasil pirolisis asap cair tempurung kelapa pada suhu 500 °C	47
8. Perbandingan konsumsi gas dan produktivitas pirolisis tempurung kelapa	48
9. Gugus fungsi pada spektrum IR asap cair tempurung kelapa	53
10. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis suhu 300 °C	55
11. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis suhu 400 °C	58
12. Komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis suhu 500 °C	60
13. Perbandingan komponen kimia asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada variasi suhu 300, 400, dan 500 °C.....	64
14. Nilai pH asap cair tempurung kelapa pada berbagai suhu pirolisis	66

15. Perbandingan pH larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa inhibitor dan dengan inhibitor 20 ppm dari tiga suhu pirolisis	75
16. Perbandingan hasil penelitian dengan literatur	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Representasi skematik proses pertukaran panas	6
2. Endapan kerak pada pipa	8
3. Nukleasi homogen.....	9
4. Nukleasi heterogen.....	10
5. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak	12
6. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan.....	18
7. Reaksi hidrolisis polifosfat.....	19
8. Skema pirolisis asap cair tempurung kelapa	20
9. Mekanisme pirolisis bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan turunannya untuk menghasilkan berbagai senyawa fenolik.....	22
10. Degradasi senyawa lignin menjadi fenolik	23
11. Struktur beberapa senyawa fenolik penting: fenol, siringol, o-, m-, p-kresol, guaiakol.....	24
12. Spektrum IR asap cair sabut kelapa	29
13. Kromatogram GC–MS dari asap cair tempurung kelapa komersial	31
14. Morfologi kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada konsentrasi 0,03 M tanpa penambahan inhibitor (a dan b) dengan penambahan inhibitor (c dan d) pada perbesaran 3500X dan 5000X	32

15. Distribusi ukuran partikel $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,03 M tanpa dan dengan inhibitor.....	33
16. Pola XRD kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa penambahan inhibitor (A) dan dengan penambahan inhibitor asap cair sabut kelapa (B)	35
17. Diagram alir penelitian.....	42
18. (a) Reaktor pirolisis kapasitas 10 kg yang digunakan pada suhu 300 °C dan 400 °C (b) Reaktor pirolisis kapasitas 20 kg yang digunakan pada suhu 500 °C	44
19. Larutan induk 2000 ppm setelah didiamkan selama 1 bulan (a) suhu pirolisis 300 °C (b) suhu pirolisis 400 °C (c) suhu pirolisis 500 °C.....	50
20. Spektrum IR asap cair tempurung kelapa dengan variasi suhu 300, 400, 500 °C	52
21. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 300 °C..	54
22. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 400 °C..	57
23. Kromatogram asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada suhu 500 °C..	60
24. Grafik berat endapan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa penambahan inhibitor pada berbagai variasi konsentrasi larutan.....	68
25. Diagram pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada suhu pirolisis 300 °C.....	70
26. Diagram pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada suhu pirolisis 400 °C.....	71
27. Diagram pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas penghambatan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada suhu pirolisis 500 °C.....	73
28. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0003 M (a) sebelum pengujian (b) setelah pengujian tanpa inhibitor (c) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (d) dengan inhibitor hasil pirolisis 400 °C (e) dengan inhibitor hasil pirolisis 500 °C, dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm	77

29. Perbandingan permukaan kupon logam pada konsentrasi larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0010 M (a) sebelum pengujian (b) setelah pengujian tanpa inhibitor (c) dengan inhibitor hasil pirolisis 300 °C (d) dengan inhibitor hasil pirolisis 400 °C (e) dengan inhibitor hasil pirolisis 500 °C, dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm	78
30. Perbandingan larutan pertumbuhan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa inhibitor dan dengan inhibitor asap cair tempurung kelapa 20 ppm (a) 0,0003 M tanpa inhibitor (b) 0,0003 M dengan inhibitor (c) 0,0010 M tanpa inhibitor (d) 0,0010 M dengan inhibitor.....	82
31. Perbandingan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (a) tanpa inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor asap cair tempurung kelapa	83
32. Morfologi kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada konsentrasi 0,0010 M tanpa penambahan inhibitor (a dan b) dengan penambahan inhibitor (c dan d) pada perbesaran 3000X dan 7000X	84
33. Distribusi ukuran partikel $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,0010 M tanpa dan dengan inhibitor asap cair tempurung kelapa.....	86
34. Difraktogram kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor asap cair tempurung kelapa.....	88
35. Model penghambatan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ oleh inhibitor	90

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembentukan kerak (*scaling*) pada permukaan peralatan industri merupakan masalah kronis yang sering dijumpai dalam berbagai sektor, termasuk industri minyak dan gas, kimia, dan sistem pendingin. Keberadaan kerak tidak hanya mengganggu efisiensi perpindahan panas dan aliran fluida, tetapi juga berpotensi memicu korosi yang dapat memperpendek usia pakai peralatan (Suharso *et al.*, 2015). Dampak ekonomi dari permasalahan ini sangat signifikan. Salah satu contohnya adalah perusahaan minyak Indonesia, yaitu Pertamina TBK, yang menghabiskan sekitar 6-7 juta dolar per sumur atau setara dengan Rp 80-90 miliar untuk mengganti pipa geotermal setiap 10 tahun (Suharso *et al.*, 2010).

Kerak terbentuk sebagai endapan padat anorganik yang mengeras pada permukaan peralatan akibat pengendapan mineral dari air. Saat air menguap di menara pendingin, uap murninya menghilang, sedangkan konsentrasi zat padat terlarut dalam air yang tersisa semakin meningkat. Jika siklus ini terus berlanjut, pada akhirnya kelarutan zat padat akan terlampaui. Zat padat tersebut kemudian mengendap di dalam pipa atau pada permukaan penukar panas, dan sering kali membeku membentuk kerak (Jotho *et al.*, 2013). Pada umumnya, komponen-komponen kerak yang dijumpai pada sistem air pendingin adalah kalsium fosfat, kalsium karbonat, kalsium sulfat dan silika, dan magnesium silikat (Raharjo, 2020). Di antara berbagai komponen kerak tersebut, kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) merupakan salah satu yang paling sulit diatasi karena kelarutannya yang rendah

dan kecenderungannya untuk membentuk deposit yang keras. Kerak kalsium fosfat sering terbentuk pada kondisi suhu tinggi dan pH netral hingga basa, yang umum dijumpai dalam sistem pendingin industri (Valiakhmetova *et al.*, 2017).

Proses pembentukan kerak dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain suhu, konsentrasi Ca^{2+} , dan keberadaan inhibitor. Kenaikan suhu akan memperpendek periode induksi karena meningkatkan frekuensi tumbukan ion mineral dalam larutan. Selain itu, konsentrasi Ca^{2+} juga berperan penting. Semakin tinggi konsentrasi Ca^{2+} , semakin banyak jumlah ion mineral dalam larutan, sehingga jumlah tumbukan antar ion mineral pembentuk kerak akan semakin besar (Raharjo, 2020).

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengendalikan pembentukan kerak, antara lain melalui pelunakan air dan injeksi asam. Namun, metode-metode ini memiliki sejumlah keterbatasan, seperti biaya produksi air bebas mineral yang tinggi dan risiko korosi akibat penanganan asam (Raharjo, 2020). Sebagai alternatif, penggunaan inhibitor kerak sintetis seperti polifosfat juga tidak lepas dari kelemahan, terutama ketidakstabilannya pada suhu tinggi yang justru dapat memicu pembentukan kerak lanjutan (Al-Deffeeri, 2007).

Upaya lain untuk mengurangi laju pertumbuhan kerak adalah dengan menginjeksikan bahan-bahan kimia pencegah kerak (*scale inhibitor*) ke dalam air formasi. Inhibitor adalah zat yang digunakan untuk mengontrol pertumbuhan kerak dengan tujuan mengurangi, mencegah, atau menunda pembentukan kerak (Rabizadeh *et al.*, 2014). Inhibitor biasanya diinjeksikan ke dalam larutan yang secara kontinyu maupun periodik. Metode ini mampu mengendalikan proses nukleasi dan pertumbuhan kristal yang terjadi pada permukaan pipa serta peralatan lainnya (Sousa dan Bertran, 2014).

Dengan demikian, pencarian inhibitor alternatif yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan menjadi sangat penting. Salah satu sumber potensial adalah bahan alam, khususnya asap cair hasil pirolisis tempurung kelapa. Tempurung kelapa yang merupakan 12% dari total buah kelapa matang (Ahmad *et al.*, 2022) merupakan biomassa lignoselulosa yang melimpah di Indonesia (Hasibuan *et al.*,

2024). Pemanfaatan limbah tempurung kelapa ini menjadi inhibitor bernilai tambah tidak hanya memberikan solusi penghambatan kerak tetapi juga alternatif pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan.

Asap cair dihasilkan melalui proses pirolisis, yaitu dekomposisi termal biomassa dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan oksigen yang sangat terbatas. Proses pirolisis melibatkan dekomposisi komponen penyusun biomassa pada rentang suhu tertentu. Hemiselulosa dan selulosa terdekomposisi antara 200–350 °C membentuk senyawa asam karboksilat dan karbonil, sedangkan lignin terdekomposisi pada 300–450 °C menghasilkan senyawa fenolik (Hasibuan *et al.*, 2024). Komposisi inilah yang diduga berperan sebagai inhibitor kerak. Oleh karena itu, variasi suhu pirolisis akan menghasilkan profil senyawa bioaktif yang berbeda, yang pada akhirnya mempengaruhi efektivitas asap cair sebagai inhibitor.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diperlukan untuk menganalisis dan mengkaji pengaruh variasi suhu pirolisis 300, 400, dan 500 °C terhadap efektivitas inhibitor asap cair tempurung kelapa dalam mencegah pembentukan kerak kalsium fosfat pada kondisi konsentrasi rendah dan temperatur tinggi di peralatan industri. Metode yang digunakan untuk mengetahui efektivitas inhibitor asap cair tempurung kelapa dalam menghambat pertumbuhan kerak dalam penelitian ini menggunakan metode *unseeded experiment*, yaitu salah satu metode pembentukan kristal tanpa penambahan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Analisis yang dilakukan mencakup identifikasi gugus fungsi dari asap cair menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectrophotometer* (FTIR), analisis komponen kimia menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS), analisis distribusi ukuran kristal dengan *Particle Size Analyzer* (PSA), analisis morfologi permukaan kalsium fosfat menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), serta identifikasi struktur kristal melalui *X-Ray Diffraction* (XRD).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis keefektifan asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis sebagai inhibitor kerak kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) menggunakan metode *unseeded experiment*.
2. Mengkaji perbedaan pertumbuhan kerak kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) pada konsentrasi larutan pertumbuhan dan konsentrasi inhibitor asap cair tempurung kelapa dengan variasi suhu pirolisis.

1.3. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kemampuan dari inhibitor asap cair tempurung kelapa yang divariasikan dalam berbagai suhu sebagai inhibitor kerak ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) 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

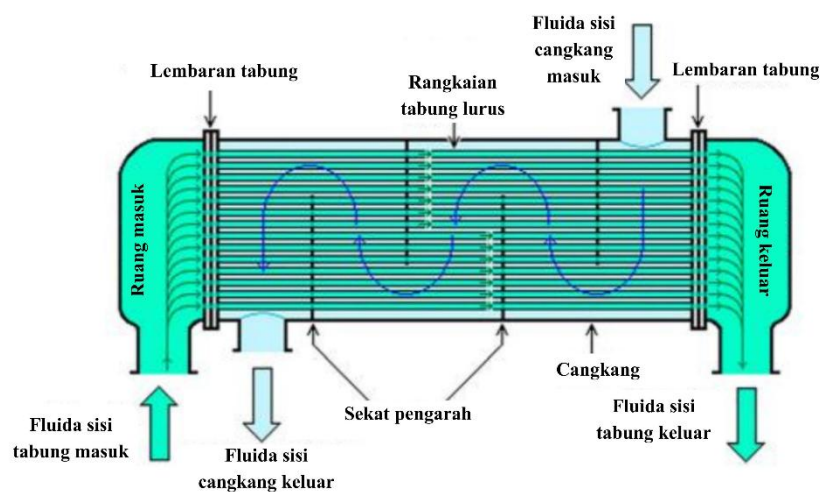
2.1. Pengendapan Senyawa Anorganik

Endapan adalah zat yang memisahkan diri dari larutan dalam bentuk fase padat. Endapan ini dapat berupa kristal atau koloid, dan dapat dipisahkan dari larutan melalui penyaringan atau sentrifugasi. Endapan terbentuk ketika larutan menjadi terlalu jenuh oleh zat tertentu (Suharso dan Buhani, 2015). Endapan kerak merupakan salah satu masalah penting dan umumnya terbentuk di pipa-pipa peralatan industri. Contohnya, pada sistem injeksi air yang biasa digunakan di ladang minyak, jumlah kerak yang banyak dapat menurunkan produksi minyak dan gas (Merdhah dan Yassin, 2007).

Proses pengendapan senyawa-senyawa anorganik sering terjadi pada peralatan industri yang menggunakan air garam, seperti industri minyak dan gas, proses desalinasi, ketel, maupun industri kimia. Hal ini terjadi karena adanya unsur-unsur anorganik pembentuk kerak, seperti logam kalsium (Ca^{2+}) dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Terakumulasinya endapan-endapan dari senyawa anorganik tersebut dapat menimbulkan masalah berupa terbentuknya kerak (Suharso dan Buhani, 2015).

Air secara luas dimanfaatkan sebagai cairan pendingin untuk membuang panas berlebih dari permukaan perpindahan panas, misalnya pada alat penukar panas, kondensor, evaporator, *cooling tower*, maupun dinding pipa. Dalam proses pendinginan, air dialirkan melalui tabung-tabung penukar panas berbahan logam

yang bersentuhan langsung dengan proses termal. Air yang menjadi panas tersebut kemudian didinginkan kembali di dalam *cooling tower* melalui mekanisme penguapan, sehingga dapat digunakan kembali secara berulang. Proses pendinginan ini menyebabkan sistem air menjadi lewat jenuh, karena adanya kandungan mineral terlarut seperti karbonat, sulfat, fosfat, silikat /oksida silika, besi, dan komponen lainnya yang dapat membentuk endapan dan kerak. Kondisi supersaturasi tersebut memicu terbentuknya kerak, terutama akibat fluktuasi suhu mendadak pada permukaan perpindahan panas ketika air bersentuhan dengan permukaan tersebut, proses tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



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

2.2. Kerak

Kerak didefinisikan sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substrat. Pengerakan adalah proses alami yang terjadi karena adanya reaksi kimia antara kandungan-kandungan yang tidak dikehendaki yang terdapat dalam air. Dalam operasi produksi di industri sering ditemui kerak mineral seperti: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaSO_4 , CaCO_3 dan MgSO_4 (Sediono dkk., 2011). Kerak terbentuk ketika larutan mencapai kondisi lewat jenuh. Dalam kondisi ini, sebagian molekul akan bergabung membentuk inti kristal. Inti kristal ini akan terlarut kembali jika ukurannya lebih kecil dari ukuran partikel kritis sementara itu kristal-kristal akan

berkembang bila ukurannya lebih besar dari partikel kritis. Jika ukuran inti kristal menjadi lebih besar dari inti kritis, maka akan mulailah pertumbuhan kristal, dari kristal kecil membentuk kristal dengan ukuran yang lebih besar (penebalan lapisan kerak). Kristal-kristal yang terbentuk memiliki muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuklah kerak (Hasson dan Semiat, 2006; Lestari, 2008).

Kerak juga dapat terbentuk akibat pencampuran air yang digunakan tidak sesuai. Ketidaksesuaian ini terjadi ketika air bereaksi secara kimia sehingga mineralnya mengendap saat dicampurkan. Contoh tipe air yang tidak sesuai yaitu air laut dengan konsentrasi SO_4^{2-} tinggi dan konsentrasi Ca^{2+} rendah, dan air formasi dengan konsentrasi SO_4^{2-} sangat rendah tetapi konsentrasi Ca^{2+} tinggi. Pencampuran kedua jenis air ini dapat menyebabkan terbentuknya endapan CaSO_4 (Merdhah dan Yassin, 2007).

Beberapa komponen utama kerak yang sering ditemukan mencakup kalsium sulfat (CaSO_4), kalsium karbonat (CaCO_3), turunan dari kalsium bikarbonat, kalsium dan seng fosfat, kalsium fosfat, sejumlah besar kalsium, dan ortofosfat. Biasanya dikarenakan air terlalu sering dirawat, silika dengan konsentrasi tinggi, besi dioksida, senyawa yang disebabkan oleh kurangnya kontrol korosi atau alami berasal dari besi yang teroksidasi, besi fosfat, (senyawa yang disebabkan karena pembentukan lapisan film dari inhibitor fosfat), mangan dioksida (mangan teroksidasi tingkat tinggi), magnesium silika, silika, dan magnesium (pada konsentrasi tinggi dengan pH tinggi), magnesium karbonat (magnesium dengan konsentrasi tinggi dan pH tinggi serta CO_2 tinggi) (Lestari, 2008).

Adanya endapan kerak pada komponen pipa dapat menyebabkan hambatan aliran fluida, baik di dalam pipa maupun pada peralatan penukar panas (*heat exchanger*). Pada peralatan penukar panas, keberadaan kerak akan mengganggu proses perpindahan panas sehingga mengakibatkan kenaikan temperatur. Sementara itu, pada pipa, aliran fluida dapat tersumbat akibat penyempitan volume aliran serta peningkatan kekasaran permukaan bagian dalam pipa, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Endapan kerak pada pipa (Vendamawan, 2016).

2.3. Mekanisme Pembentukan Kerak

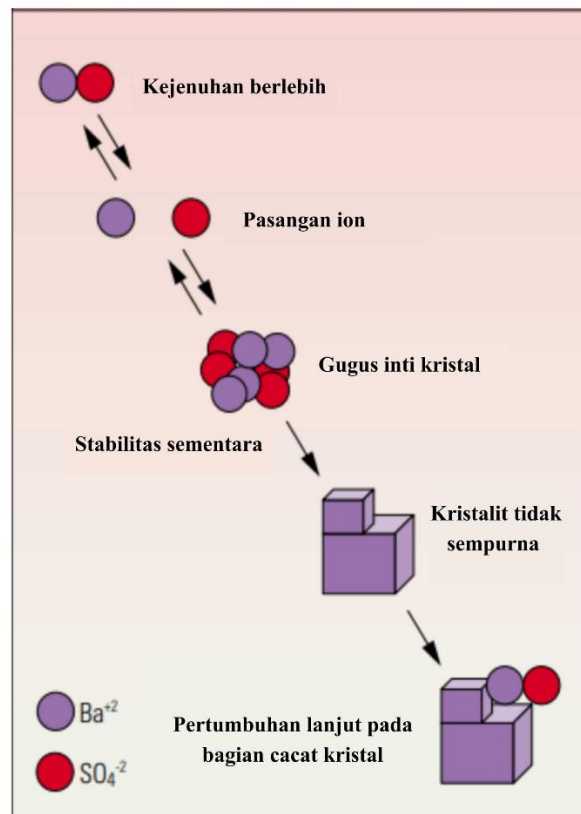
Menurut Raharjo (2020), mekanisme pembentukan kerak dapat dikelompokkan menjadi enam langkah sebagai berikut:

1. Tahap pembentukan inti kristal (nukleasi)

Pada tahap ini ion-ion yang terkandung dalam suatu fluida akan mengalami reaksi kimia untuk membentuk inti kristal. Inti kristal yang terbentuk sangat halus sehingga tidak akan mengendap dalam proses aliran. Selama proses inisiasi dapat diamati dengan turunnya nilai konduktivitas secara signifikan. Waktu pertama kali nilai konduktivitas disebut waktu induksi. Setelah periode ini telah diamati, ketahanan *fouling* mulai meningkat dengan waktu dalam beberapa mode. Sedangkan berdasarkan metode pembentukannya, pembentukan kristal dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu secara homogen (*homogeneous nucleation*) dan heterogen (*heterogeneous nucleation*).

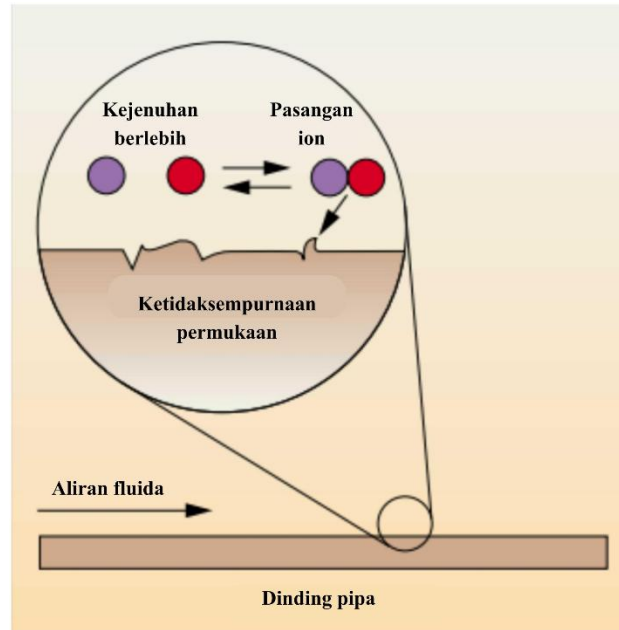
Nukleasi homogen terjadi pada larutan jenuh yang kaya ion atau molekul, membentuk inti awal yang disebut embrio. Jika embrio melebihi ukuran kritis, agregat ini menjadi stabil dan tumbuh secara spontan. Ion atau molekul dalam larutan juga dapat membentuk rantai pendek yang awalnya berupa monolayer datar, lalu berkembang menjadi kisi kristal. Proses kristalisasi ini berlangsung sangat cepat dan hanya terjadi pada tingkat kejenuhan sangat tinggi. Setelah

melewati ukuran kritis, inti kristal dapat tetap stabil meskipun pada kondisi kejenuhan rata-rata. Teori nukleasi ini didasarkan pada kondensasi uap ke cair, fenomena ini juga berlaku pada kristalisasi dari larutan (Mersmann *et al.*, 2002). Gambar 3 menunjukkan pertumbuhan dan pengendapan kerak pada nukleasi homogen.



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

Pembentukan inti kristal heterogen terjadi setelah nukleasi homogen. Kehadiran zat asing, seperti pengotor, dapat mempercepat proses nukleasi heterogen. Sulit menghindari keberadaan partikel asing di dalam peralatan. Umumnya, nukleasi heterogen berlangsung lebih cepat karena partikel asing berperan sebagai katalis pertumbuhan kristal, sehingga kristal dapat tumbuh lebih cepat. Gambar 4 menunjukkan pertumbuhan dan pengendapan kerak pada nukleasi heterogen.



Gambar 4. Nukleasi heterogen (Crabtree *et al.*, 1999).

2. Tahap pertumbuhan inti

Pada tahap pertumbuhan inti, molekul-molekul di sekitarnya akan tertarik dan menempel pada inti tersebut, menyebabkan inti tersebut berkembang menjadi partikel yang lebih besar dengan ukuran sekitar 0,0010 hingga 0,1 μm (ukuran koloid). Selanjutnya, partikel ini terus bertambah besar hingga mencapai ukuran 0,1 sampai 10 μm (kristal halus). Ketika ukuran kristal melebihi 10 μm , kristal akan mulai mengendap karena ukurannya yang sudah cukup besar (kristal kasar).

3. Tahap Pengendapan kristal ke permukaan

Kristal kasar yang terbentuk selama proses pertumbuhan akan mengendap ke permukaan melalui beberapa mekanisme, yaitu difusi, sedimentasi, turbulensi, dan termoforesis. Difusi berperan penting dalam proses pergerakan, khususnya dalam perpindahan partikel mineral dan gas. Sedimentasi menjadi signifikan ketika partikel padat berada dalam aliran fluida dengan kecepatan rendah. Pusaran dalam aliran fluida dapat menembus lapisan laminar dan membawa partikel padat menuju permukaan, sementara semburan turbulen diketahui sebagai mekanisme yang efektif untuk mengangkat partikel. Mekanisme termoforesis terjadi pada

partikel berukuran di bawah 5 mikron dan menjadi dominan pada kisaran ukuran 0,1 mikron.

4. *Attachment* ke permukaan

Tidak semua kerak yang terbawa ke permukaan akan langsung melekat. Gaya-gaya yang bekerja saat partikel mendekati permukaan sangat menentukan dalam proses ini. Karakteristik partikel seperti kerapatan, elastisitas, sifat permukaan, dan kondisi fisiknya, serta sifat permukaan tempat melekat seperti tingkat kekasaran dan jenis materialnya, turut berperan penting dalam menentukan efektivitas proses pelepasan atau removal partikel tersebut.

5. *Removal* dari permukaan

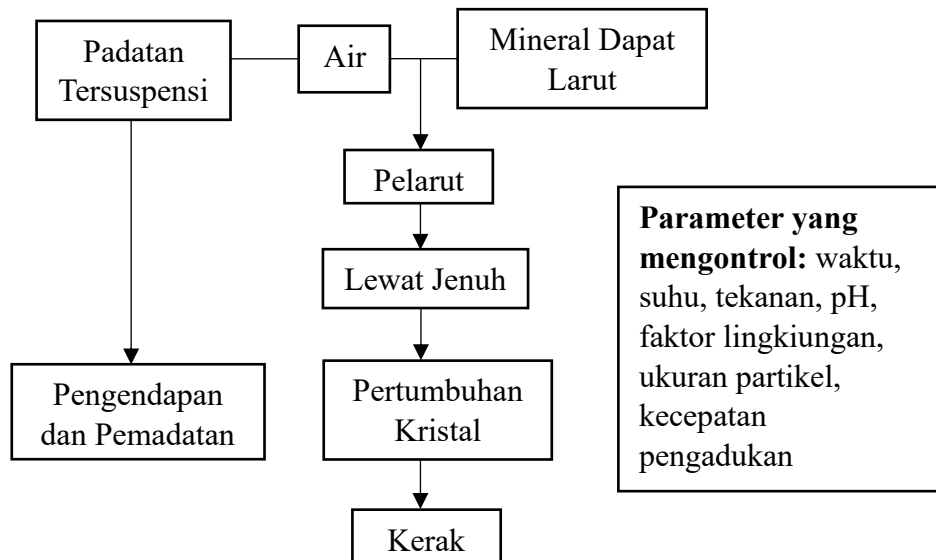
Kristal yang tidak mengalami *attachment* ke permukaan dapat mengalami *removal*. Partikel kristal yang terlepas dari permukaan dapat dihilangkan melalui beberapa mekanisme, seperti spalling akibat gaya geser dan semburan turbulen, pelarutan kembali material deposit, serta proses erosi. Kecepatan aliran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

6. *Aging* Deposit

Ketebalan deposit bertambah seiring waktu hingga mencapai nilai stabil dan kekuatan mekanik deposit dapat berubah dengan waktu karena perubahan dalam struktur kristal atau komposisi kimia dari deposit. Penuaan atau *aging* dapat memperkuat atau memperlemah deposit kerak.

Kondisi ini mendukung pertumbuhan partikel kristal kerak ketika larutan mencapai tingkat kejenuhan tertentu sehingga memicu proses nukleasi. Air dapat membawa senyawa seperti silikat, kalsium sulfat, magnesium karbonat, dan kalsium karbonat yang kemudian mengendap dan membentuk lapisan kerak.

Perubahan ini umumnya terjadi pada peralatan proses seperti boiler, evaporator, penukar panas, dan menara pemanas. Gambar 5 memperlihatkan diagram mekanisme pembentukan kerak beserta parameter penting yang memengaruhi setiap tahapannya.



Gambar 5. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak (Salimin dan Gunandjar, 2007).

2.4. Faktor Pembentukan Kerak

Ukuran kristal yang terbentuk pada proses pengendapan dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu laju nukleasi (pembentukan inti) dan laju pertumbuhan kristal. Laju nukleasi menunjukkan banyaknya inti yang terbentuk dalam rentang waktu tertentu. Semakin tinggi laju nukleasi, semakin besar pula jumlah kristal berukuran kecil yang dihasilkan. Di sisi lain, laju pertumbuhan kristal menentukan seberapa besar kristal berkembang setelah inti terbentuk; semakin cepat pertumbuhannya, maka semakin besar ukuran kristal yang dihasilkan. Kedua proses ini, baik nukleasi maupun pertumbuhan kristal, dipengaruhi oleh tingkat lewat jenuh larutan. Menurut Fachry dkk. (2008), salah satu faktor yang paling memengaruhi ukuran kristal adalah kecepatan nukleasi dan laju pertumbuhannya (*growth rate*). Faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan kristal di antaranya:

1. Kristalisasi

Kristalisasi merupakan proses pembentukan partikel padat dari suatu fase homogen. Proses ini dapat terjadi dalam berbagai bentuk, seperti pembentukan partikel padat dari uap (contohnya pembentukan salju), pembekuan lelehan cair menjadi kristal tunggal maupun polikristal, serta kristalisasi dari larutan cair (Nagy and Braatz, 2012). Kristalisasi dari larutan terjadi ketika konsentrasi zat terlarut melebihi batas kelarutan (kondisi lewat jenuh), sehingga sistem berusaha mencapai kesetimbangan dengan membentuk kristal dari zat terlarut tersebut. Pembentukan kerak pada permukaan perpindahan panas merupakan salah satu bentuk kristalisasi yang berlangsung langsung di permukaan padat. Proses ini dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu tingkat lewat jenuh (*supersaturation*), pembentukan inti kristal (*nucleation*), dan waktu kontak antara larutan dengan permukaan padat. Selama proses penguapan, kondisi jenuh (*saturation*) dan lewat jenuh (*supersaturation*) tercapai secara bersamaan akibat peningkatan konsentrasi larutan dan penurunan kelarutan dengan naiknya suhu hingga titik penguapan. Kristalisasi umumnya dipicu oleh perubahan fisik, seperti kenaikan suhu atau proses penguapan. Ketika penguapan berlangsung, larutan menjadi semakin pekat hingga mencapai kondisi jenuh, di mana kemampuan larutan untuk melarutkan zat telah maksimal. Jika proses penguapan terus berlanjut, larutan akan memasuki kondisi lewat jenuh yang mendorong zat terlarut untuk mengendap dan membentuk kristal (Mandela, 2017).

2. Derajat Lewat Jenuh

Larutan lewat jenuh (*supersaturated solution*) merupakan larutan dalam keadaan metastabil yang mengandung zat terlarut lebih banyak dibandingkan larutan jenuh. Pada kondisi ini, gangguan kecil seperti perubahan suhu atau getaran dapat memicu terjadinya kristalisasi. Keadaan supersaturasi biasanya terbentuk ketika zat terlarut ditambahkan ke dalam pelarut pada pH dan suhu tertentu, sehingga melampaui batas kelarutannya dan menyebabkan terbentuknya kristal.

Menurut Whitten *et al.* (2014), tingkat kelarutan suatu larutan dapat dibedakan menjadi tiga wilayah, yaitu daerah stabil, daerah metastabil, dan daerah labil. Pencapaian kondisi supersaturasi merupakan salah satu faktor kunci keberhasilan proses kristalisasi, karena pada kondisi ini larutan mengandung zat terlarut lebih banyak daripada yang dapat larut secara normal pada suhu tertentu. Kondisi tersebut mendorong terbentuknya inti kristal (*nucleation*), yang selanjutnya berkembang melalui proses pertumbuhan kristal (*crystal growth*) menjadi kristal berukuran lebih besar (Gotama dan Mahfud, 2015).

3. Kelarutan Endapan

Kelarutan merupakan jumlah maksimum suatu zat yang dapat larut dalam sejumlah pelarut hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Besarnya kelarutan, yang dilambangkan dengan huruf “s” (*solubility*), menunjukkan sejauh mana suatu zat dapat larut dalam pelarut tertentu (Astuti dkk., 2022). Endapan akan terbentuk ketika zat terlarut melebihi batas kelarutannya, sehingga sebagian zat tersebut terpisah dari larutan dan membentuk fase padat.

Nilai kelarutan suatu zat setara dengan konsentrasi molar larutan jenuhnya, dan besarnya sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, tekanan, komposisi pelarut, konsentrasi ion, serta keberadaan zat lain dalam larutan. Hasil kali kelarutan (*solubility product constant*, K_{sp}) merepresentasikan keadaan kesetimbangan antara fase padat dan fase larutan dari zat yang sukar larut. Meskipun K_{sp} tidak menunjukkan laju pencapaian kesetimbangan, nilai ini penting untuk menjelaskan kondisi kesetimbangan serta memprediksi kemungkinan terjadinya reaksi pengendapan (Valiakhmetova *et al.*, 2017).

4. Suhu

Pada kondisi dengan suhu yang relatif stabil, seperti pada suhu kamar, pengaruh suhu terhadap proses pergerakan umumnya tidak terlalu signifikan. Namun, di lingkungan industri yang mengalami fluktuasi suhu, perubahan suhu dapat berdampak besar terhadap pembentukan kerak. Hal ini disebabkan karena kelarutan beberapa senyawa anorganik cenderung menurun seiring dengan

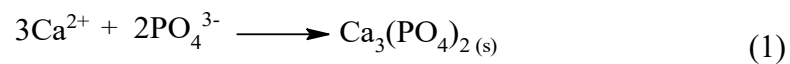
peningkatan suhu. Akibatnya, pada suhu tinggi, ion-ion terlarut lebih mudah mengendap dan membentuk kerak. Laju pembentukan kerak diketahui meningkat pada suhu air sekitar 50 °C atau lebih, dan kerak sering kali terbentuk secara intensif pada suhu di atas 60 °C. Secara kimiawi, peningkatan suhu memberikan energi kinetik yang lebih besar pada molekul-molekul reaktan, sehingga meningkatkan frekuensi tumbukan antar partikel. Kondisi ini mempercepat laju reaksi dan mendorong terbentuknya lebih banyak kristal padat sebagai hasil pengendapan (Rahmadyo dkk., 2017).

2.5. Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)

Kalsium fosfat adalah kelompok mineral yang mengandung ion kalsium (Ca^{2+}), ortofosfat (PO_4^{3-}), pirofosfat ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$), hidrogen (H^+), dan hidroksida (OH^-). Mineral ini dikenal memiliki sifat biokompatibel, bioaktif, dan osteokonduktif, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan bioimplan. Bioaktivitas kalsium fosfat sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tingkat kemurnian, ukuran kristal, morfologi, konsentrasi, pH, dan suhu. Berbagai bentuk material kalsium fosfat, seperti kalsium hidrogen fosfat dihidrat (CHPD), trikalsium fosfat (TCP), dan hidroksiapatit (HA), telah banyak diteliti dan diaplikasikan secara luas sebagai biomaterial, media penghantaran obat (*drug delivery*), antiseptik, hingga agen antikanker (Sinambela *et al.*, 2012).

Kalsium fosfat merupakan padatan putih dengan sedikit keabu-abuan yang sedikit larut dalam air. Kalsium fosfat terbentuk sebagai hasil dari reaksi kimia antara kalsium (Ca^{2+}) dan ortofosfat (PO_4^{2-}). Secara kimia, endapan dikarakteristikan sebagai trikalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Kalsium fosfat lebih mungkin terbentuk ketika konsentrasi ortofosfat melebihi 10 ppm pada suhu dan pH yang lebih tinggi, ini membentuk deposit padat mirip dengan kalsium karbonat. Kalsium fosfat kurang larut dalam pH netral dan basa tetapi larut dalam asam (Dorozhkin., 2012).

Kalsium fosfat merupakan salah satu endapan penyusun kerak yang menimbulkan masalah serius pada sebagian besar proses industri yang melibatkan air garam dan pada operasi produksi minyak bumi (Halimatuddahlia, 2003). Kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) dibuat dari reaksi $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_3\text{PO}_4$ dalam air, atau melewati CO_2 melalui suspensi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam air yang murni. Kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) berupa endapan amorf putih terbentuk dari reaksi ion kalsium (Ca^{2+}) dalam bentuk CaCl_2 dengan ion fosfat (PO_4^{3-}) dalam bentuk Na_3PO_4 (Dorozhkin., 2012). Reaksi pembentukan endapan kalsium fosfat dapat digambarkan melalui Persamaan 1 berikut:



Fosfat dari kalsium tidak larut dalam air dan hasil kali kelarutannya menurun dengan naiknya ukuran Ca^{2+} (Dorozhkin., 2012).

2.6. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak

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

1. Pengendalian pH

Pengaturan pH melalui injeksi asam, seperti asam sulfat atau asam klorida, telah lama digunakan sebagai metode untuk mencegah terbentuknya kerak akibat garam-garam kalsium, logam bivalen, serta fosfat. Umumnya, kelarutan senyawa penyebab kerak meningkat ketika pH menurun. Namun, bila pH berada di bawah 6,5, risiko korosi pada material seperti baja karbon, tembaga, dan paduannya menjadi sangat tinggi. Rentang pH yang dianggap efektif untuk mencegah terbentuknya kerak berkisar antara 7,0 hingga 7,5. Oleh karena itu, sistem injeksi asam yang dikendalikan secara otomatis sangat diperlukan untuk menjaga pH tetap stabil. Di sisi lain, penggunaan asam seperti asam sulfat dan klorida

memerlukan penanganan yang ekstra hati-hati karena sifatnya yang cukup berbahaya (Suharso dan Buhani, 2015).

2. Pelunakan dan Pembebasan Mineral

Untuk mencegah terbentuknya kerak pada air dengan tingkat kesadahan yang cukup tinggi (sekitar 250 ppm), diperlukan proses pelunakan menggunakan kapur dan soda abu, yang dikenal sebagai pengolahan kapur dingin. Penggunaan air bebas mineral juga dapat menjadi solusi, karena seluruh kandungan garam terlarut di dalam air telah dihilangkan, sehingga pembentukan kerak dapat dicegah sepenuhnya. Oleh karena itu, air bebas mineral dianggap sebagai metode yang efektif untuk mencegah kerak, terutama pada sistem dengan beban panas tinggi, di mana pengolahan secara konvensional menggunakan bahan penghambat kerak tidak lagi memberikan hasil yang optimal (Lestari *et al.*, 2004; Baraka and Sorbie, 2010). Namun demikian, penggunaan air bebas mineral dalam skala industri memerlukan biaya yang cukup tinggi, sehingga dapat menurunkan efisiensi operasional secara keseluruhan.

3. Penggunaan Inhibitor Kerak

Secara umum, inhibitor kerak merupakan zat kimia yang berfungsi untuk menghentikan atau mencegah terbentuknya kerak ketika ditambahkan dalam jumlah kecil ke dalam air (Suharso dan Buhani, 2015). Penggunaan zat kimia ini cukup menarik karena efektif mencegah pembentukan kerak dalam jangka waktu lama meskipun hanya digunakan dalam dosis rendah. Salah satu cara kerja inhibitor kerak adalah dengan membentuk senyawa kelat, yaitu senyawa kompleks antara inhibitor dengan unsur-unsur pembentuk kerak. Senyawa ini bersifat larut dalam air, sehingga menghambat pertumbuhan kristal berukuran besar. Umumnya, penggunaan bahan kimia tersebut juga didukung oleh penggunaan bola spons yang berfungsi membersihkan permukaan bagian dalam pipa secara mekanis.

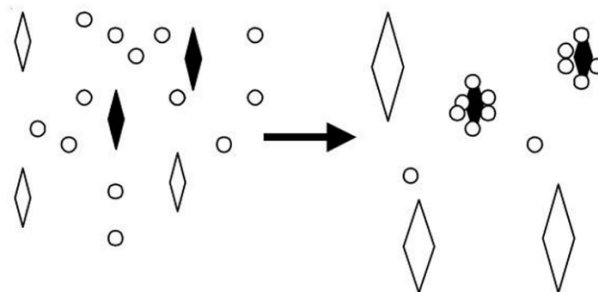
Terdapat beberapa syarat-syarat yang harus dimiliki senyawa kimia sebagai inhibitor kerak yaitu:

1. Inhibitor kerak harus menunjukkan kestabilan termal yang cukup dan efektif untuk mencegah terbentuknya air sadah dari pembentukan kerak.
2. Inhibitor kerak harus dapat merusak struktur kristal dan padatan tersuspensi lain yang mungkin akan terbentuk.
3. Inhibitor kerak juga harus memiliki tingkat keamanan yang tinggi dalam penggunaannya sehingga tidak menimbulkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan sekitar (Al-Deffeeri, 2007).

Mekanisme kerja inhibitor kerak terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Inhibitor kerak dapat teradsorpsi pada permukaan kristal kerak pada saat mulai terbentuk. Inhibitor merupakan kristal yang besar yang dapat menutupi kristal yang kecil dan menghalangi pertumbuhan selanjutnya.
2. Dalam banyak hal bahan kimia dapat dengan mudah mencegah menempelnya suatu partikel-partikel pada permukaan padatan (Suharso *et al.*, 2007).

Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dapat diilustrasikan dalam Gambar 6. Gambar 6 memberikan gambaran bagaimana kerja Inhibitor dalam mengadsorpsi pada sisi-sisi pertumbuhan kristal dari bibit kristal (ditunjukkan pada kristal yang diberi warna hitam) yang mengakibatkan pertumbuhan kristal menjadi terhambat. Sedangkan pada bibit kristal yang tidak teradsorpsi oleh inhibitor (ditunjukkan pada kristal yang tidak diberi warna) mengalami pertumbuhan normal. Simbol $\circ$ menunjukkan inhibitor dan $\diamond$ menunjukkan bibit kristal (Suharso *et al.*, 2014).

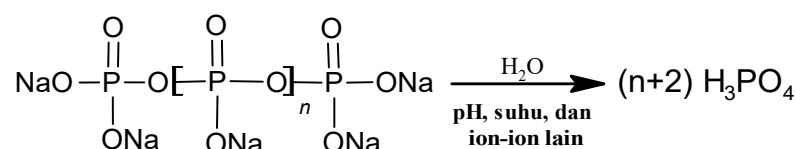


Gambar 6. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan (Suharso *et al.*, 2014).

Inhibitor kerak dalam industri terbagi menjadi dua jenis, yaitu anorganik dan organik. Jenis anorganik meliputi kondensat fosfat dan dehidrat fosfat yang mengandung gugus P-O-P untuk menempel pada permukaan kristal, sedangkan jenis organik mencakup organofosfonat dan polimer organik (Asnawati, 2001).

Polifosfat merupakan contoh inhibitor murah yang mampu menyerap permukaan kristal dan menghambat pertumbuhannya. Namun, senyawa ini mudah terhidrolisis pada suhu di atas 90 °C menjadi ortofosfat yang justru dapat memicu pembentukan kerak baru (Al-Deffeeri, 2007).

Reaksi hidrolisis polifosfat yang ditunjukkan pada Gambar 7 merupakan fungsi dari temperatur, pH, waktu, dan keberadaan ion-ion lain dalam larutan.



Gambar 7. Reaksi hidrolisis polifosfat (Suharso dan Buhani, 2015).

Ortofosfat yang dihasilkan dapat menyebabkan menurunnya kemampuan untuk menghambat pertumbuhan kerak dan menyebabkan terbentuknya kerak baru dari presipitasi kalsium fosfat, sehingga penggunaan polifosfat sebagai inhibitor kerak hanya efektif pada temperatur rendah (Al-Deffeeri, 2007).

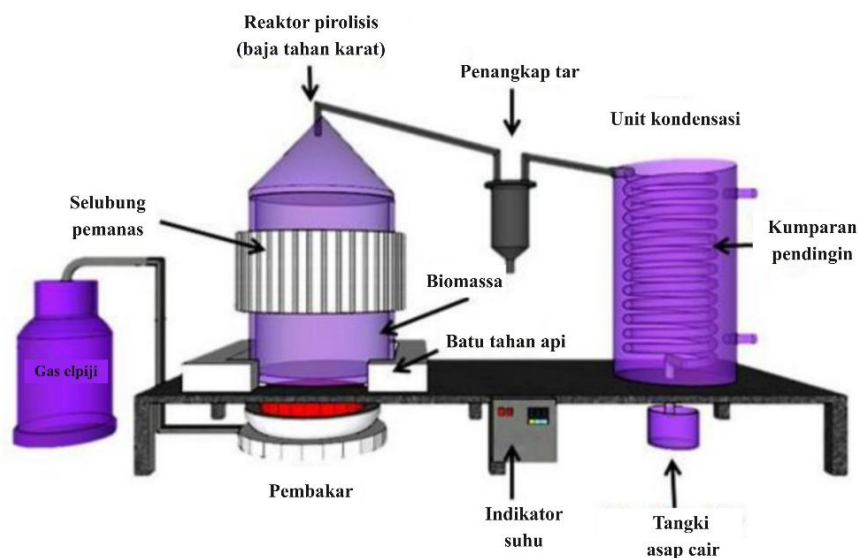
2.7. Asap Cair Tempurung Kelapa

Menurut Djalil dkk. (2024), asap cair atau *liquid smoke* merupakan hasil kondensasi uap dari pembakaran bahan-bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Asap cair mengandung fenol, asam, dan karbonil. Manfaat asap cair dapat sebagai *chelating agent* yaitu tambahan makanan yang dapat mengikat logam yang terkandung dalam pangan. Asap cair mengandung asam asetat dan asam karboksilat lainnya yang menyebabkan sifat asam pada asap cair. Asam

asetat berasal dari pirolisis selulosa dan hemiselulosa yang terdapat pada tanaman (Swastawati *et al.*, 2022).

2.7.1. Proses Pirolisis

Proses pirolisis adalah proses dekomposisi termal senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana pada kondisi tanpa udara atau adanya udara dalam jumlah yang terbatas. Produk cair dari proses pirolisis disebut sebagai asap cair (*liquid smoke*) (Pratama dan Sa'diyah, 2022). Skema kerja alat pirolisis dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Skema pirolisis asap cair tempurung kelapa (Desvita *et al.*, 2025).

Menurut Jayanudin dkk. (2012), pada proses pirolisis dihasilkan tiga macam penggolongan produk yaitu:

1. Gas

Gas-gas yang dikeluarkan pada proses karbonisasi ini sebagian besar berupa gas CO_2 dan sebagian lagi berupa gas-gas yang mudah terbakar seperti CO , CH_4 , H_2 , dan hidrokarbon tingkat rendah lain.

2. Destilat berupa asap cair dan tar

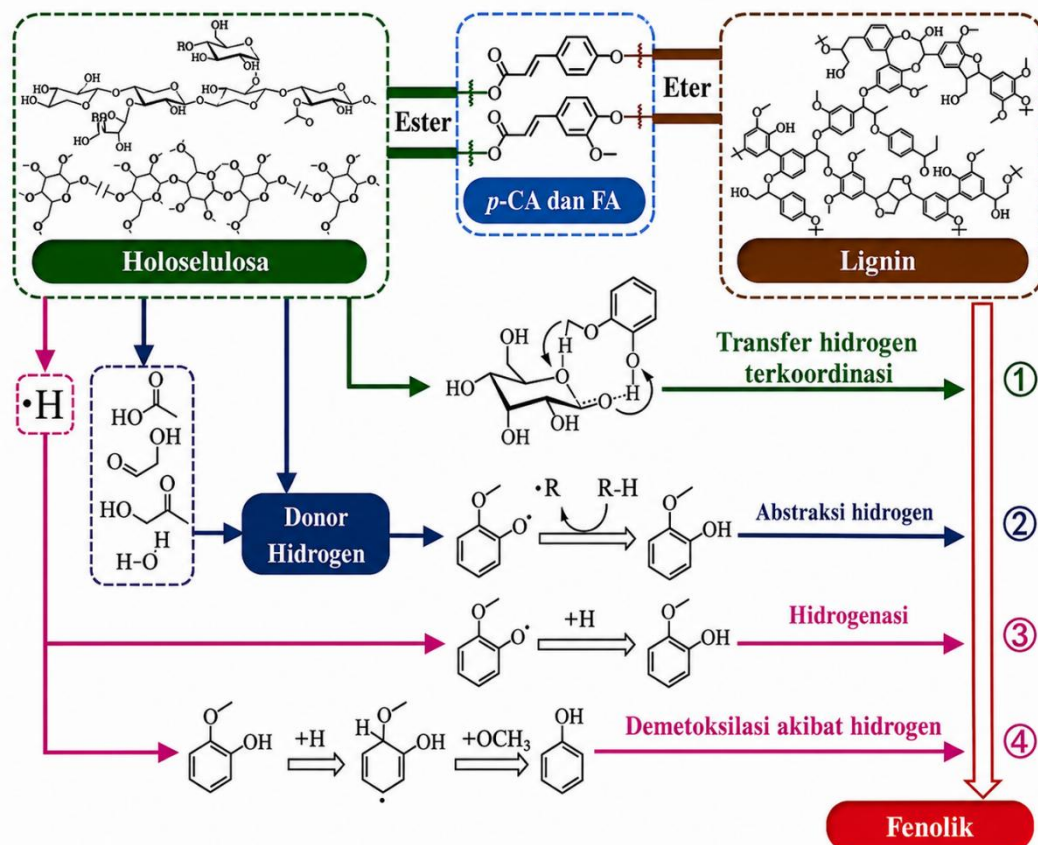
Komposisi utama dari produk yang tertampung adalah metanol dan asam asetat. Bagian lainnya merupakan komponen minor yaitu fenol, metil asetat, asam format, asam butirat dan lain-lain.

3. Residu (karbon)

Tempurung kelapa dan kayu mempunyai komponen-komponen yang hampir sama. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam kayu berbeda-beda tergantung dari jenis kayu. Pada umumnya kayu mengandung dua bagian selulosa dan satu bagian hemiselulosa, serta satu bagian lignin.

Seperti yang disebutkan, asap cair biasanya berasal dari proses dekomposisi bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan turunannya melalui pirolisis, yang menghasilkan senyawa fenolik, furfural, karbonil, dan asam karboksilat derajat rendah (Wang *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2022; Vuppaladadiyam *et al.*, 2023).

Hu *et al.* (2022) juga menjelaskan mekanisme pirolisis bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan turunannya untuk menghasilkan berbagai senyawa fenolik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Mekanisme pirolisis bahan yang mengandung lignin, selulosa, dan turunannya untuk menghasilkan berbagai senyawa fenolik (Hu *et al.*, 2022).

Menurut Jayanudin dkk. (2012) pada proses pirolisis terjadi dekomposisi senyawa-senyawa penyusunnya, yaitu:

a) Pirolisis selulosa

Selulosa adalah makromolekul yang dihasilkan dari kondensasi linear struktur heterosiklis molekul glukosa. Selulosa terdiri dari 100-1000 unit glukosa. Selulosa terdekomposisi pada temperatur 280 °C dan berakhir pada 300-350 °C. Pirolisis selulosa berlangsung dalam dua tahap, yaitu: tahap pertama adalah reaksi hidrolisis menghasilkan glukosa, dan tahap kedua merupakan reaksi yang menghasilkan asam asetat dan homolognya, bersama-sama air dan sejumlah kecil furan dan fenol.

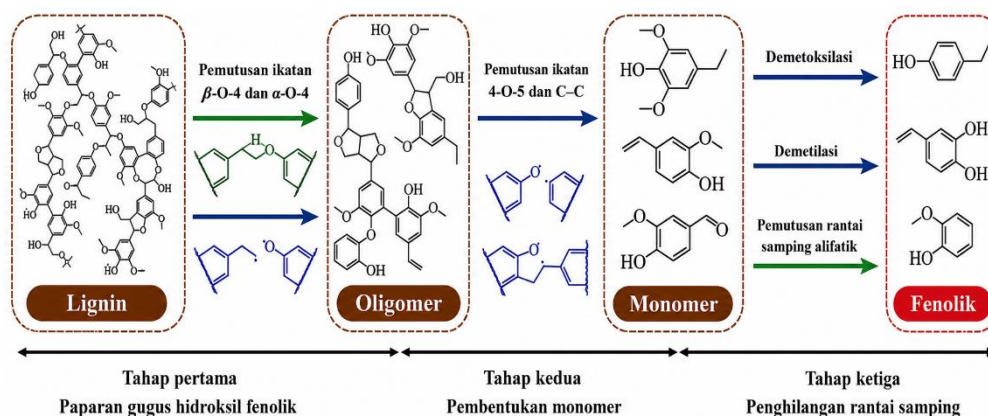
b) Pirolisis hemiselulosa

Hemiselulosa merupakan polimer dari beberapa monosakarida seperti pentosan ($C_5H_8O_4$), dan heksosan ($C_6H_{10}O_5$). Pirolisis pentosan menghasilkan furfural, furan, dan derivatnya beserta satu seri panjang asam-asam karboksilat. Pirolisis heksosan terutama menghasilkan asam asetat dan homolognya. Hemiselulosa akan terdekomposisi pada temperatur 200-250 °C.

c) Pirolisis lignin

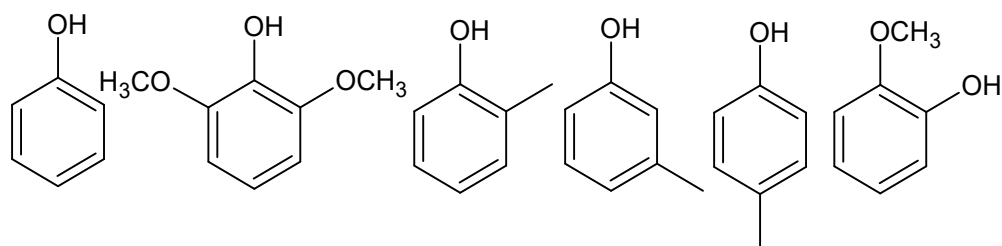
Lignin merupakan sebuah polimer kompleks yang mempunyai berat molekul tinggi dan tersusun atas unit-unit fenil propana. Senyawa-senyawa yang diperoleh dari pirolisis struktur dasar lignin berperan penting dalam memberikan aroma asap produk asapan. Senyawa ini adalah fenol, eter fenol seperti guaiakol, siringol dan homolog serta derivatnya. Lignin mulai mengalami dekomposisi pada temperatur 300-350 °C dan berakhir pada 400-450 °C.

Berikut mekanisme reaksinya dimulai dengan dekomposisi lignin menjadi oligomer dan monomer (Hu *et al.*, 2022), seperti yang digambarkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Degradasi senyawa lignin menjadi fenolik (Hu *et al.*, 2022).

Senyawa lignin, yang merupakan komponen utama dalam kulit kelapa, diperoleh dari asap cair pirolisis, yang mengandung berbagai senyawa fenolik penting, termasuk fenol, siringol, o-, m-, p-kresol, guaiakol (Rout, 2013), yang struktur molekulnya ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Struktur beberapa senyawa fenolik penting: fenol, siringol, o-, m-, p-kresol, guaiakol (Gani *et al.*, 2024).

2.7.2. Kandungan Asap Cair Tempurung Kelapa

Pada dasarnya bahan baku untuk menghasilkan asap cair ini bermacam-macam, antara lain kayu, tandan kosong kelapa sawit, cangkang sawit, tempurung kelapa sawit, pelepah sawit, tempurung kelapa dan ampas hasil penggergajian (Saputra dkk., 2020). Asap cair memiliki banyak manfaat salah satunya yaitu sebagai inhibitor (Choi *et al.*, 2001).

Asap cair memiliki kemampuan sebagai antioksidan dan antibakteri yang bermanfaat untuk mengawetkan bahan pangan karena mengandung senyawa-senyawa fenol, yang merupakan salah satu komponen aktif utama di samping karbonil, keton, aldehida, asam-asam, lakton, alkohol, furan, dan ester. Selain itu, asap cair juga dapat memengaruhi tekstur pada produk olahan seperti daging dan ikan, serta mengubah kualitas nutrisi pada produk olahan (Saputra dkk., 2020).

Kualitas dan komposisi asap cair sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku yang digunakan dalam proses pirolisis. Tempurung kelapa merupakan salah satu bahan baku yang banyak digunakan karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia dan kandungan lignoselulosa yang tinggi. Komponen utama penyusun tempurung kelapa, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin, berperan langsung dalam menentukan jenis dan jumlah senyawa aktif yang dihasilkan selama proses pirolisis. Komposisi kimia tempurung kelapa secara lengkap disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Komposisi kimia tempurung kelapa

Komponen	%
Hemiselulosa	27,7
Selulosa	26,5
Lignin	29,4
Abu	0,6
Komponen ekstraktif	4,2
Uronat dihidrat	3,5
Nitrogen	0,1
Air	0,8

Sumber: Himawati (2010)

Menurut Fauzan dan Ikhwanus (2017), asap cair dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan kualitas dan kegunaannya masing-masing:

1. Asap cair *grade 1*

Merupakan kualitas terbaik yang aman digunakan sebagai pengawet makanan, seperti pada bakso, mie, tahu, maupun bumbu *barbeque*. Asap cair ini memiliki warna bening, rasa sedikit asam, aroma yang netral, dan tidak lagi mengandung senyawa berbahaya sehingga sangat cocok diaplikasikan pada produk pangan.

2. Asap cair *grade 2*

Digunakan sebagai pengganti formalin dalam pengawetan makanan, memberikan cita rasa khas asap seperti pada daging asap atau ikan asap. Berwarna kecoklatan transparan, dengan rasa asam sedang dan aroma asap yang tidak terlalu kuat.

3. Asap cair *grade 3*

Tidak direkomendasikan untuk produk makanan karena masih mengandung tar yang bersifat karsinogenik. Namun, asap cair jenis ini dapat dimanfaatkan dalam industri non-pangan, seperti untuk penghilang bau dalam pengolahan karet dan sebagai pengawet kayu agar tahan terhadap serangan rayap.

Perbedaan perlakuan dalam proses pembuatan asap cair, baik melalui pirolisis langsung (*grade 3*), distilasi (*grade 2*), maupun filtrasi dengan arang aktif (*grade 1*), akan memengaruhi sifat fisik dan kimia asap cair yang dihasilkan. Perubahan tersebut dapat diamati dari nilai pH dan warna larutan asap cair. Data mengenai karakteristik pH dan warna asap cair tempurung kelapa dibandingkan dengan asap cair komersial disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. pH dari asap cair komersial dan tempurung kelapa

Sampel	Perlakuan	pH	Warna
Asap cair dari tempurung kelapa	Pirolisis (<i>grade 3</i>)	0,5	Cokelat kemerahan
	Pemurnian dengan distilasi (<i>grade 2</i>)	1,7	Kuning muda
	Filtrasi dengan arang aktif (<i>grade 1</i>)	2,3	Bening agak keruh
Asap cair komersial	Komersial	2,1	Tidak berwarna

Sumber: Gani *et al.* (2024)

Kandungan senyawa dalam asap cair tempurung kelapa dapat diidentifikasi menggunakan teknik *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC–MS). Hasil analisis menunjukkan bahwa asap cair mengandung senyawa fenol, karbonil, dan asam organik dengan titik didih yang bervariasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan asap cair tempurung kelapa serta titik didihnya

Senyawa	Titik didih (°C, 76 mmHg)
Fenol	
Guaikol	205
4-metilguaikol	211
Eugenol	244
Siringol	267
Furfural	162
Piroketakol	240
Hidroquinon	285
Isoeugenol	266
Karbonil	
Glioksal	51
Metilglioksal	72
Glioksaldehid	97
Diasetil	88
Formaldehid	21
Asam	
Asam asetat	118
Asam butirat	162
Asam propionat	141
Asam isovalerat	176

Sumber: Himawati (2010)

2.8. Metode *Unseeded Experiment*

Menurut Aisah (2016), metode *unseeded experiment* merupakan salah satu metode pembentukan kristal dengan cara tanpa menambahkan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan. Hal ini dilakukan untuk melihat laju pertumbuhan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Metode ini biasanya digunakan untuk pemeliharaan alat-alat industri yang masih baru sehingga dibutuhkan pencegahan pertumbuhan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

2.9. Analisis dan Karakterisasi Kerak Kalsium Fosfat

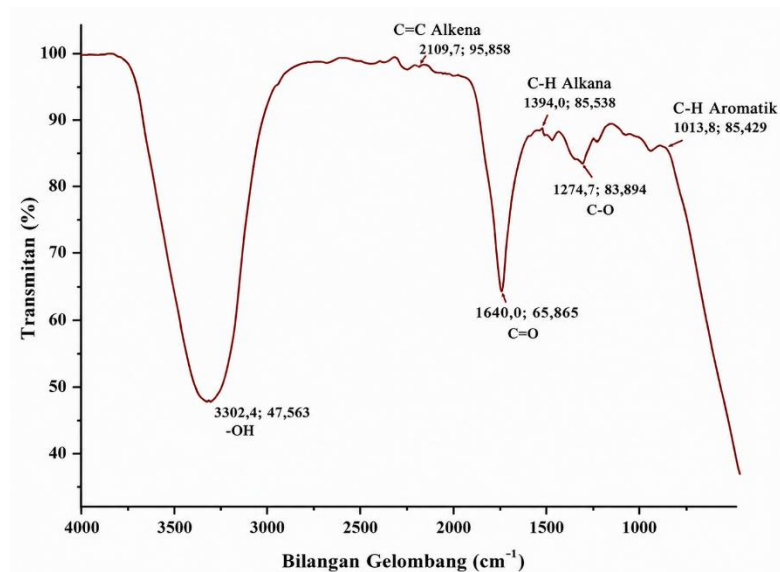
Pada penelitian ini dilakukan beberapa analisis terhadap kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang terbentuk. Analisis tersebut meliputi analisis gugus fungsi dan komponen kimia terhadap asap cair tempurung kelapa dengan menggunakan spektrofotometer

FTIR dan GC-MS, untuk mengetahui morfologi permukaan kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ menggunakan SEM dan XRD digunakan untuk menentukan struktur kristal kerak kalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), serta analisis distribusi ukuran partikel menggunakan PSA. Analisis ini dilakukan agar dapat mengetahui seberapa efektif asap cair tempurung kelapa dalam menghambat pembentukan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

2.9.1. Spektrofotometri *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

FTIR adalah salah satu alat atau instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa, serta menganalisis campuran dari sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel. Daerah inframerah pada spektrum gelombang elektromagnetik dimulai dari panjang gelombang 14.000 cm^{-1} hingga 10^{-1} cm^{-1} . FTIR juga dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi. Spektroskopi FTIR dapat menganalisis adanya campuran dalam sampel tanpa merusak sampel yang akan dianalisis. Analisis spektroskopi inframerah mencakup beberapa metode yang berdasarkan atas absorpsi atau refleksi dari radiasi elektromagnetik. Bila suatu senyawa ditempatkan pada suatu pancaran inframerah, energi yang diserap menyebabkan perubahan vibrasi ikatan. Spektrum inframerah yang dihasilkan merupakan data kompleks, sehingga dapat menggambarkan secara menyeluruh karakteristik kimia suatu sampel (Abriyani dkk., 2024).

Prinsip kerja FTIR yaitu interaksi antara energi dan materi. Infrared yang melewati celah ke sampel, dimana celah tersebut berfungsi mengontrol jumlah energi yang disampaikan kepada sampel. Kemudian beberapa infrared diserap oleh sampel dan yang lainnya di transmisikan melalui permukaan sampel sehingga sinar infrared lolos ke detektor dan sinyal yang terukur kemudian dikirim ke komputer dan direkam dalam bentuk puncak-puncak (Sari dkk., 2018). Spektrum IR asap cair sabut kelapa dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Spektrum IR asap cair sabut kelapa (Jaya, 2020).

Berdasarkan hasil spektrum FTIR pada Gambar 12, dapat diamati adanya beberapa pita serapan yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi tertentu pada asap cair tempurung kelapa. Untuk memperjelas identifikasi gugus fungsi tersebut, berikut disajikan data kelompok spesifik dan rentang panjang gelombang hasil analisis FTIR pada Tabel 4.

Tabel 4. Kelompok spesifik dan rentang panjang gelombang FTIR.

Gugus Fungsi	Jenis Senyawa	Daerah Serapan (cm^{-1})
C-H	Alkana	2850–2960, 1350–1470
C-H	Alkena	3020–3080, 675–870
C=C	Alkena	1640–1680
C-H	Alkana	3300
C-H	Aromatik	3000–3100, 675–870
C=C	Aromatik	1500–1600
C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, eter	1080–1300
C=O	Aldehid, keton, asam karboksilat, ester	1690–1760
O-H	Alkohol, fenol (monomer)	3610–3640
O-H	Alkohol, fenol (ikatan H)	2000–3600
O-H	Asam karboksilat	3000–3600
N-H	Amina	3310–3500
C-N	Amina	1180–1360
NO ₂	Nitro	1515–1560, 1345–1386

Sumber: Amalia *et al.* (2021)

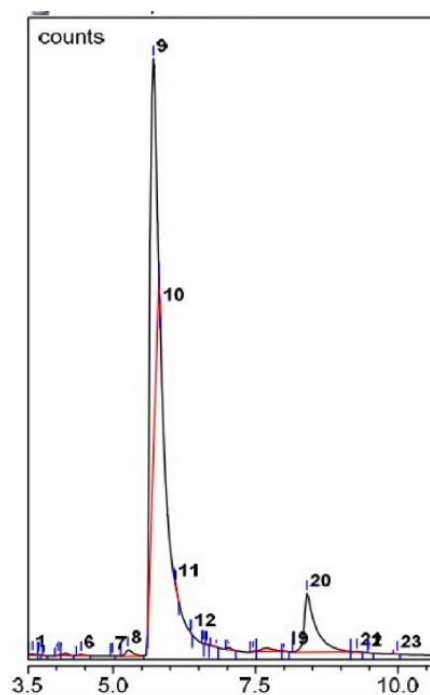
2.9.2. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS adalah metode yang digunakan untuk pemisahan dan digunakan untuk mengidentifikasi suatu komponen dalam suatu campuran sampel yang umumnya berupa senyawa-senyawa yang mudah menguap. GC-MS terdiri dari dua buah alat yaitu kromatografi gas dan spektrometri massa sebagai detektor. GC-MS bertujuan sebagai alat pemisah berbagai komponen pada suatu sampel yang pemisahannya tergantung dari titik didih senyawa yang ada pada suatu sampel yang dianalisis dan interaksi antara analit dengan fase diam maupun gerak (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

Prinsip kerja dari alat kromatografi gas ini adalah sampel cairan diinjeksikan ke dalam injektor yang nantinya akan diuapkan. Sampel yang sudah diuapkan tersebut kemudian dibawa oleh gas pembawa menuju kolom tempat terjadinya pemisahan. Senyawa dengan titik didih yang tinggi memiliki waktu retensi yang lama dibandingkan dengan senyawa yang memiliki titik didih lebih rendah. Prinsip kerja spektrometri massa yaitu menembak bahan yang sedang dianalisis dengan berkas elektron dan secara kuantitatif mencatat hasilnya sebagai suatu spektrum fragmen ion positif (Harnani, 2010). Fragmen ion positif tersebut nantinya akan berkelompok sesuai dengan massanya sehingga nantinya diperoleh berat molekul dari senyawa yang terkandung.

Analisis menggunakan GC-MS dapat dilakukan secara kualitatif dengan membandingkan waktu retensi dan spektrum massa terhadap pustaka spektrum massa (*mass spectra database*), serta secara kuantitatif dengan menghitung tinggi atau luas puncak kromatogram dibandingkan larutan baku. Kinerja GC-MS dipengaruhi oleh beberapa parameter, terutama temperatur injeksi, temperatur kolom, dan temperatur sumber ion (*ion source*). Umumnya, suhu injeksi diatur sekitar 50 °C di atas titik didih senyawa yang dianalisis. Suhu yang terlalu rendah dapat menurunkan efisiensi penginjeksian, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan dekomposisi termal (peruraian) pada sampel. Oleh karena itu, volatilitas sampel menjadi faktor penting: sampel dengan volatilitas tinggi dianalisis pada suhu rendah, sedangkan suhu tinggi berisiko merusak komponen

penyusunnya (Aprilia *et al.*, 2023). Berdasarkan penelitian Gani *et al* (2024), hasil kromatogram GC-MS dari asap cair tempurung kelapa komersial pada Gambar 13 menunjukkan adanya berbagai senyawa volatil yang berhasil diidentifikasi melalui pola spektrum massanya.



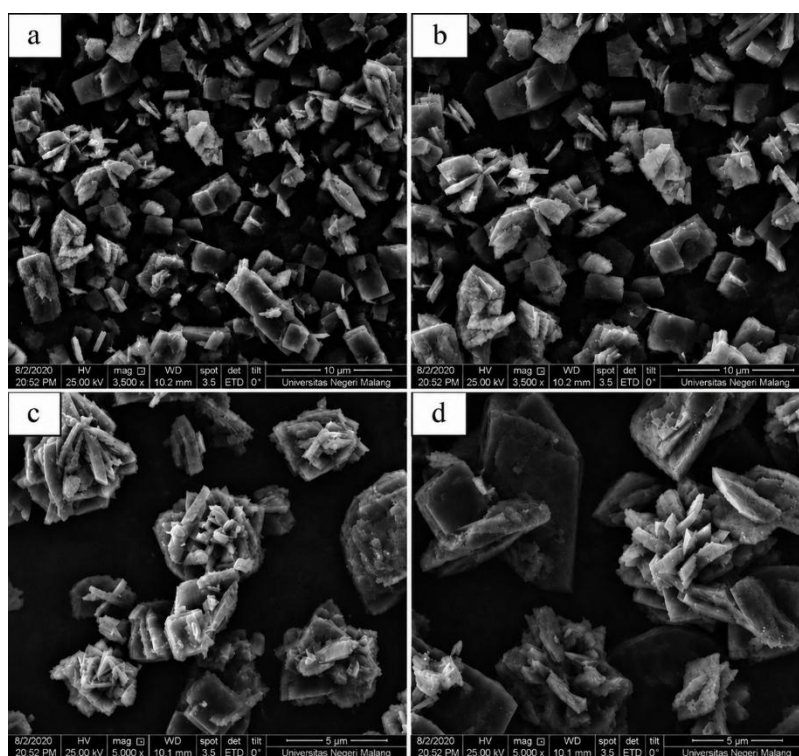
Gambar 13. Kromatogram GC-MS dari asap cair tempurung kelapa komersial (Gani *et al.*, 2024).

2.9.3. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

SEM adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang mampu memberikan gambaran permukaan suatu sampel dengan resolusi tinggi. Prinsip kerja alat SEM yaitu dengan memanfaatkan hamburan balik elektron (*electron beam*) pada permukaan objek dan mengambil gambar dengan mendeteksi elektron yang muncul pada permukaan objek (Setyaningsih dan Septiano, 2019). Pada proses ini, terdapat dua jenis elektron yang dihasilkan dari interaksi berkas elektron dengan sampel, yaitu *secondary electron* (SE) dan *backscattered electron* (BSE). SE berasal dari hamburan inelastik yang menghasilkan elektron berenergi rendah (<50 eV) dari lapisan permukaan dan memberikan informasi mengenai topografi

permukaan. Sedangkan BSE berasal dari hamburan elastik, yaitu ketika elektron primer memantul kembali dari inti atom dengan kehilangan energi yang kecil. Elektron jenis ini memberikan kontras berdasarkan perbedaan nomor atom (*Z-contrast*), di mana area dengan unsur berat tampak lebih terang dibandingkan unsur ringan (Fischer *et al.*, 2013).

Kemajuan dalam penggunaan SEM memungkinkan pemindaian pada area yang lebih luas serta pengumpulan data dalam jumlah besar untuk mengidentifikasi karakteristik sampel, beberapa diantaranya yaitu menghitung objek dan mengumpulkan statistik objek tersebut, salah satunya mendapatkan citra morfologi ukuran untuk menentukan distribusi ukuran (Kharin, 2020). Pengujian SEM memungkinkan mendapatkan hasil citra morfologi dan konsentrasi dari campuran bahan (Septiano dkk., 2021). Berikut adalah morfologi SEM dari kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,03 M yang ditunjukkan pada Gambar 14.

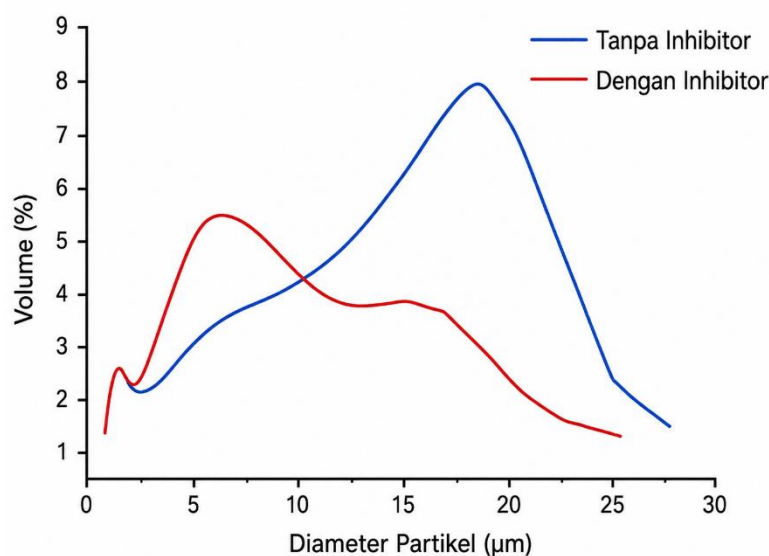


Gambar 14. Morfologi kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada konsentrasi 0,03 M tanpa penambahan inhibitor (a dan b) dengan penambahan inhibitor (c dan d) pada perbesaran 3500X dan 5000X (Jaya, 2020).

2.9.4. Particle Size Analyzer (PSA)

PSA berfungsi sebagai instrumen analisis untuk menentukan distribusi ukuran partikel berskala nanometer. Prinsip kerjanya memanfaatkan fenomena hamburan cahaya laser oleh partikel sampel. Dalam mekanisme kerjanya, laser dipancarkan melalui pinhole dan diarahkan ke partikel, yang kemudian memantulkan cahaya tersebut kembali melalui pinhole menuju detektor. Sinyal analog yang tertangkap dikonversi menjadi sinyal digital untuk selanjutnya diproses menjadi data distribusi ukuran partikel dalam bentuk histogram (Nuraeni dkk., 2013).

Keunggulan utama PSA terletak pada akurasinya yang lebih tinggi dibanding teknik karakterisasi lain seperti XRD atau SEM, karena pengukuran dilakukan pada partikel tunggal yang terdispersi dalam medium. Kelebihan lainnya mencakup kemampuan memberikan gambaran komprehensif mengenai distribusi ukuran partikel dan rentang pengukuran yang luas, sehingga sesuai untuk berbagai kebutuhan analisis (Anindya, 2018). Dalam penelitian ini, PSA digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran partikel kerak kalsium fosfat yang berukuran nanometer. Berdasarkan penelitian Jaya (2020), distribusi partikel dari kerak kalsium fosfat berubah setelah penambahan inhibitor yang ditunjukkan pada Gambar 15.



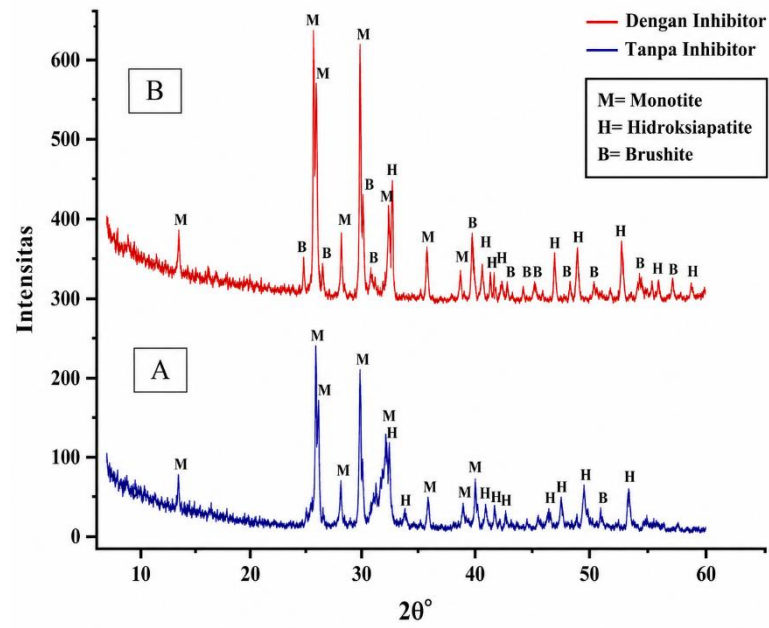
Gambar 15. Distribusi ukuran partikel $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0,03 M tanpa dan dengan inhibitor (Jaya, 2020).

2.9.5. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan suatu teknik karakterisasi untuk menganalisis material kristalin. Metode ini memanfaatkan radiasi sinar-X untuk mengidentifikasi struktur kristalit secara kualitatif dan komposisi fase secara kuantitatif. Lebih lanjut, XRD dapat mengungkap informasi mengenai konfigurasi atom, orientasi kristal, serta berbagai jenis ketidaksempurnaan dalam struktur kristal. Sebagai metode non-destruktif yang serba guna, XRD mampu menganalisis beragam bentuk kristal, baik dalam sampel padat maupun serbuk (Hakim dkk., 2019). Fenomena difraksi terjadi ketika sinar-X dihamburkan oleh kisi kristal, menghasilkan pola hamburan yang teratur. Pola ini timbul akibat interferensi gelombang, yang dapat bersifat konstruktif (menguatkan sinyal) atau destruktif (melemahkan sinyal), bergantung pada keselarasan fasanya (Muttaqin, 2023). Meskipun sinar-X merupakan radiasi yang paling umum digunakan, teknik ini juga dapat memanfaatkan elektron atau neutron. Panjang gelombang sinar-X yang berkisar antara 0,5 hingga 2,5 angstrom menjadikannya ideal untuk mendalami struktur atomik material (Hakim dkk., 2019).

Prinsip kerja XRD berlandaskan pada fenomena hamburan dan interferensi sinar-X saat berinteraksi dengan suatu material. Pada interaksi tersebut, sebagian sinar-X akan diserap, diteruskan, dan dihamburkan. Interferensi konstruktif, yang menjadi kunci dalam analisis XRD, terjadi ketika gelombang-gelombang yang terhambur berada dalam fase yang sama, sehingga saling menguatkan. Sebaliknya, interferensi destruktif terjadi ketika fasanya berbeda. Untuk menganalisis interferensi konstruktif guna menentukan jarak antar bidang kristal, digunakan persamaan yang dikenal sebagai Hukum Bragg (Rani, 2022).

Berdasarkan penelitian Jaya (2020), perubahan bentuk kristal dapat dilihat dari puncak-puncak difraksi yang mengalami perubahan fasa dari kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor asap cair sabut kelapa yang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Pola XRD kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa penambahan inhibitor (A) dan dengan penambahan inhibitor asap cair sabut kelapa (B) (Jaya, 2020).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 sampai Februari 2026 di Laboratorium Kimia Anorganik dan Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung. Analisis menggunakan instrumen FTIR dan SEM yang dilakukan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu (UPA) Universitas Lampung, GC-MS dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia, PSA dan XRD 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 Otsuka ELSZ-2000 series (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 dalam penelitian ini yaitu $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, asap cair tempurung kelapa, akuades, dan kertas saring.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pembuatan Asap Cair

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

3.3.2. Pembuatan Inhibitor Asap Cair Tempurung Kelapa

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

dihomogenkan. Prosedur yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 10, 15, dan 20 ppm dengan menyesuaikan volume larutan 100 ppm yang digunakan. Selanjutnya, nilai keasaman (pH) dari masing-masing larutan inhibitor diukur menggunakan pH meter.

Karakterisasi asap cair tempurung kelapa dilakukan menggunakan analisis FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terkandung di dalam sampel. Selain itu, analisis GC-MS dilakukan untuk mengidentifikasi komponen senyawa kimia yang terdapat dalam asap cair tempurung kelapa. Analisis GC-MS dilakukan menggunakan instrumen Shimadzu QP 2010 SE dengan kolom Rtx-5MS (5% *diphenyl/95% dimethyl polysiloxane*) sebagai fasa diam dan gas helium sebagai fasa gerak. Temperatur oven kolom diatur pada 80 °C dengan temperatur injeksi sebesar 250 °C. Analisis dilakukan menggunakan mode split dengan laju alir total gas pembawa sebesar 30,9 mL/menit dan linear flow 0,46 mL/menit. Rentang massa yang dianalisis berada pada m/z 40–550. Identifikasi senyawa dilakukan dengan membandingkan spektrum massa hasil analisis terhadap pustaka spektrum pada library WILEY7.LIB yang tersedia pada perangkat lunak GC-MS.

3.3.3. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Tahapan untuk pengujian asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor dalam pengendapan kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dengan metode *unseeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

3.3.3.1. Penentuan Pertumbuhan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Tanpa Penambahan Inhibitor pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode *Unseeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dan $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M masing-masing dalam 100 mL akuades. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk

menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dan larutan $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam *waterbath* pada suhu 80 °C selama 4 jam untuk mencapai kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3 jam. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ sebesar 0,0004; 0,0005; dan 0,0010 M untuk menghasilkan larutan pertumbuhan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tanpa penambahan inhibitor sebesar 0,0002; 0,00025; dan 0,0005 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 Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan dengan Metode *Unseeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara mencampurkan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dan $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M masing-masing dalam 100 mL inhibitor asap cair tempurung kelapa 5 ppm. Kemudian, masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C hingga homogen. Kemudian larutan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dan $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dicampurkan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 80 °C agar terbentuk kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam *waterbath* pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam untuk mencapai kesetimbangan. Selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu $105\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ sebesar 0,0004; 0,0005; dan 0,0010 M serta pada variasi inhibitor 10, 15, dan 20 ppm menggunakan asap cair tempurung kelapa. Endapan yang terbentuk ditimbang, kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi yang paling efektif sehingga dapat dilakukan analisis morfologinya menggunakan instrumen SEM, analisis struktur kristal menggunakan XRD, dan distribusi ukuran partikel dalam endapannya menggunakan PSA.

3.3.3.3. Pengujian Efektivitas Inhibitor terhadap Pembentukan Kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ pada Sistem dengan Laju Alir

Larutan pertumbuhan disiapkan dengan melarutkan $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M dan $\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0,0003 M masing-masing ke dalam 1000 mL larutan inhibitor asap cair tempurung berkonsentrasi 20 ppm. Setiap larutan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 15 menit pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ hingga homogen, kemudian kedua larutan dicampurkan dan diaduk kembali selama 15 menit pada suhu yang sama untuk memicu pembentukan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

Larutan yang mengandung endapan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dipertahankan pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam sambil dialirkan melalui alat *turbine digital flow meter fuel* yang telah dipasang kupon logam yang sebelumnya dibersihkan, dikeringkan, dan ditimbang untuk memperoleh berat awal. Setelah pengujian, kupon logam dikeringkan dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat akhir, kemudian selisih berat digunakan untuk menentukan massa endapan dan menghitung efektivitas inhibitor. Hal ini dilakukan secara berulang pada berbagai variasi konsentrasi untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap pembentukan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

3.3.4. Analisis Data

Data yang diperoleh berupa jumlah endapan terhadap waktu dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dan variasi konsentrasi campuran inhibitor, masing-masing diplot sebagai jumlah endapan terhadap waktu menggunakan Microsoft Excel. Morfologi kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan SEM. Perubahan ukuran partikel dari kelimpahan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, pada masing-masing endapan dari setiap percobaan yang dilakukan juga dianalisis dengan PSA. Struktur kristal $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis dengan XRD.

Data yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui efektivitas dari asap cair tempurung kelapa sebagai inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan endapan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Suharso *et al.*, 2019), dengan menggunakan Persamaan 2 berikut:

$$\% \text{ Efektivitas inhibitor} = \frac{C_a - C_b}{C_a - C_0} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

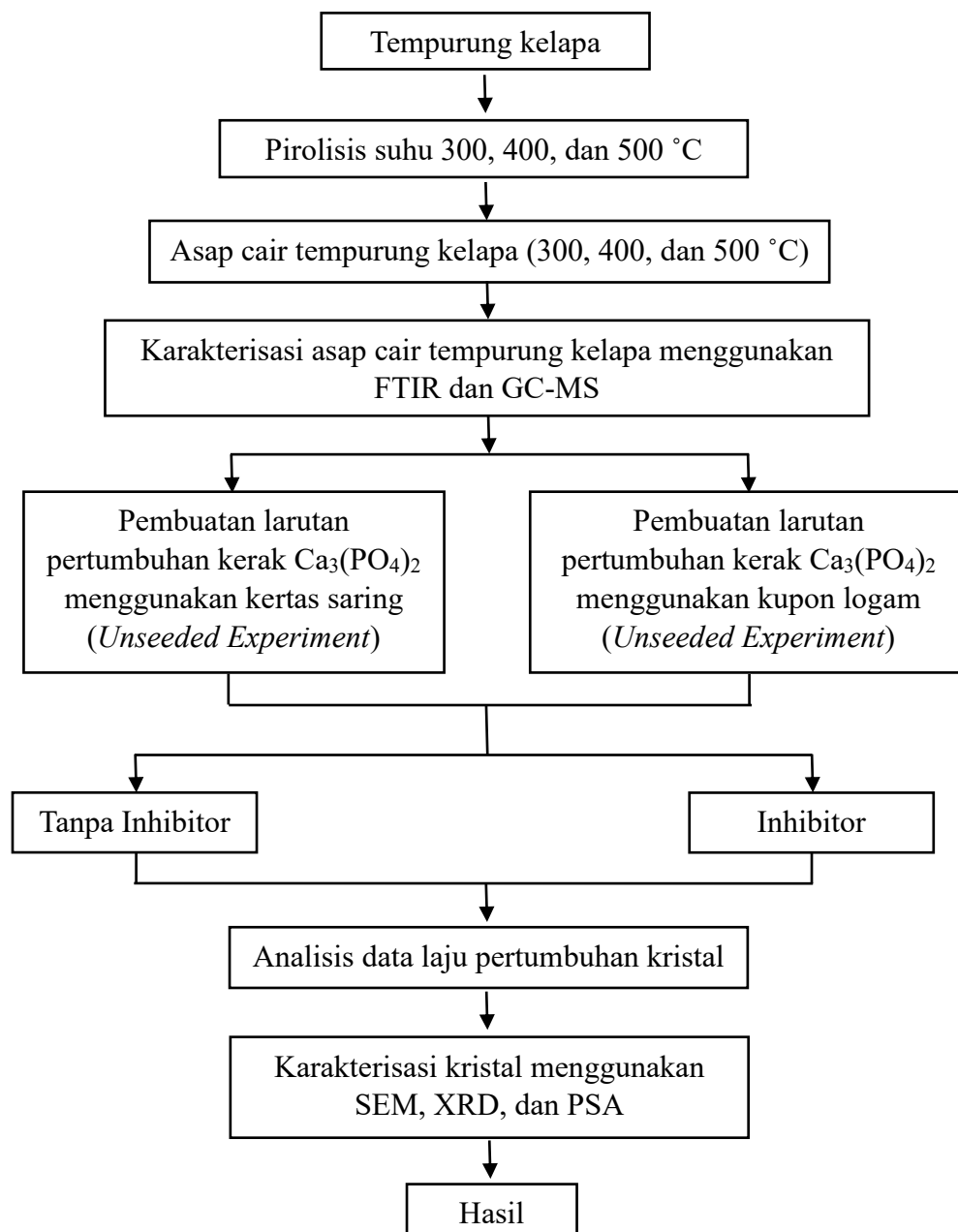
C_a = berat endapan tanpa penambahan inhibitor pada saat kesetimbangan (g/L)

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

C_0 = berat endapan awal (g/L)

3.3.5. Diagram Alir Penelitian

Secara keseluruhan, rangkaian alur pada penelitian ini dapat diilustrasikan melalui diagram penelitian yang terlihat dalam Gambar 17.



Gambar 17. Diagram alir penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

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

1. Asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis pada variasi suhu 300, 400, dan 500 °C mampu menghambat pertumbuhan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dengan persentase penghambatan berkisar antara 29,01% hingga 94,12%. Efektivitas meningkat seiring peningkatan konsentrasi inhibitor dan menurun seiring peningkatan konsentrasi larutan pertumbuhan.
2. Nilai efektivitas tertinggi diperoleh pada suhu pirolisis 400 °C dengan konsentrasi inhibitor 20 ppm dan konsentrasi larutan pertumbuhan 0,0003 M, yaitu sebesar 94,12%. Hasil ini didukung oleh pengujian kupon logam dengan efektivitas sebesar 95,45%. Urutan efektivitas inhibitor dari tertinggi ke terendah adalah 400 °C > 300 °C > 500 °C.
3. Analisis SEM menunjukkan bahwa tanpa penambahan inhibitor, kristal membentuk agregat yang padat dan kompak, sedangkan dengan penambahan inhibitor 20 ppm, partikel menjadi lebih renggang dan tidak menyatu.
4. Analisis PSA menunjukkan bahwa ukuran partikel rata-rata meningkat dari 7285,90 nm tanpa inhibitor menjadi 7477,60 nm dengan penambahan inhibitor. Meskipun peningkatan tersebut tidak signifikan, nilai PDI meningkat dari 0,460 menjadi 0,665, yang menunjukkan distribusi ukuran partikel menjadi lebih heterogen setelah penambahan inhibitor.

5. Analisis XRD menunjukkan perubahan fase kristal kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dari hidroksiapatit fase monoklinik tanpa inhibitor menjadi hidroksiapatit fase heksagonal setelah penambahan inhibitor, yang mengindikasikan perubahan keteraturan struktur kristal.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis menyarankan pengembangan penelitian selanjutnya melalui kajian lebih lanjut terkait efektivitas asap cair tempurung kelapa hasil pirolisis suhu 400 °C dalam menghambat pembentukan kerak $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang divariasikan berdasarkan *grade* (1, 2, dan 3) guna mengetahui pengaruh perbedaan komposisi kimia terhadap kemampuan inhibisinya. Selain itu, penulis juga menyarankan penggunaan metode kupon logam sebagai pengganti kertas saring karena lebih representatif dalam menggambarkan kondisi nyata pada sistem perpipaan, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abriyani, E., Syalomita, D., Apriani, I. P., Puspawati, I., Adiputra, S., dan Nadeak, Z. T. 2024. Pengaruh Pengolahan Termal Terhadap Struktur Molekul Material Polimer Studi Dengan Spektroskopi FTIR. *Innovative: Journal Of Social Science Research*. 4(1): 3424-3432.
- Ahmad, R. K., Sulaiman, S. A., Yusup, S., Dol, S. S., Inayat, M., dan Umar, H. A. 2022. Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Journal Ain Shams Eng*. 13(1): 1-13
- Aisah, S. 2016. Efek Penambahan Ekstrak Gambir (*Uncaria Gambier Roxb*), Kemenyan Putih (*Styrx Benzoin Dryand*), dan Aditif Golongan Karboksilat sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Skripsi*. Jurusan Kimia FMIPA. Universitas Lampung. Lampung.
- Akkuş, M., Akçay, Ç., and Yalçın, M. 2022. Antifungal and Larvicidal Effects of Wood Vinegar on Wood-Destroying Fungi and Insects. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 37 (24): 1-10.
- 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.
- Amalia, R. A., Nugroho, F. A., and Susanto, I. 2021. Synthesis and Characterization of Chitosan-Sodium Alginate Composite Membrane for Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Application. *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science (iCAST-ES 2021)*. 1054–1062.
- Anindya, A. L. 2018. Particle size analyser: Beberapa Penggunaan Instrumen Hamburan Cahaya. In *Prosiding Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi*. 59-62.
- Aprilia, S. A., Wonorahardjo, S., and Utomo, Y. 2023. Analysis of Flavor in Roasted Coffee Using Temperature Programmable Injection (TPI) at GC/MS Method. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*. 4(1): 46-53.

- Asnawati. 2001. Pengaruh Temperatur Terhadap Reaksi Fosfonat dalam Inhibitor Kerak pada Sumur Minyak. *Jurnal Ilmu Dasar*. 2(1): 20-26.
- Astuti, S. I., Lestari, P., Aprianingsih, T., Sumardani, T. Z., Wicaksana, G. C., dan Sholiah, A. 2022. Pengaruh suhu terhadap kelarutan dan viskositas pada gula pasir. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*. 11(1): 19-21.
- Baraka-Lokmane, S., and Sorbie, K. S. 2010. Effect of pH and Scale Inhibitor Concentration on Phosphonate–Carbonate Interaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 70(1-2): 10-27.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- Chauhan, K., Sharma, P., and Chauhan, G. S. 2015. Removal/Dissolution of Mineral Scale Deposits. *Mineral scales and deposits*, 701-720.
- Choi, B. C., Tennessee, L. M., and Eijkemans, G. J. 2001. Developing Regional Workplace Health and Hazard Surveillance in The Americas. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 10: 376-381.
- Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Johnson, A., and King, G. 1999. Fighting Scale Removal and Prevention. *Oilfield review*. 11(3): 30-45.
- Danaei, M. R. M. M., Dehghankhold, M., Ataei, S., Hasanzadeh Davarani, F., Javanmard, R., Dokhani, A., and Mozafari, Y. M. 2018. Impact of particle size and polydispersity index on the clinical applications of lipidic nanocarrier systems. *Pharmaceutics*. 10(2): 57.
- Desvita, H., Oramahi, H. A., Diba, F., Yanti, H., and Heriansyah, M. B. 2025. Preliminary study on the chemical components of west kalimantan's ubah rukkuk wood (*Santiria griffithii*) liquid smoke. *Journal of Ecological Engineering*. 26(7): 343-351.
- Djalil, J. P., Salimi, Y. K., Iyabu, H., Bialangi, N., Mohamad, E., dan Kunusa, W. R. 2024. Karakteristik Kimia Dan Organoleptik Asap Cair Tempurung Kelapa Dalam Menurunkan Cemaran Logam Timbal (Pb) Pada Ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*). *Jambura Fish Processing Journal*. 6(1): 52-65.
- Dorozhkin, S. V. 2012. Amorphous Calcium Orthophosphates: Nature, Chemistry and Biomedical Applications. *Int. J. Mater. Chem*. 2(1): 19-46.
- 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.

- Fauzan, F., dan Ikhwanus, M. 2017. Pemurnian Asap Cair Tempurung Kelapa Melalui Distilasi dan Filtrasi Menggunakan Zeolit dan Arang Aktif. *Prosiding Semnastek*. Universitas Malikussaleh Lhokseumawe. Banda Aceh.
- Fischer, E. R., Hansen, B. T., Nair, V., Hoyt, F. H., and Dorward, D. W. 2013. Scan electron microsc. *Curr. Protoc. Microbiol.* 25(2): 1-76.
- Gani, A., Adlim, M., Rahmayani, R. F. I., Hanum, L., and Nabila, R. 2024. Preparation and characterization of coconut shell liquid smoke and the properties of preserving tofu. *Kuwait Journal of Science*. 51(4): 100289.
- Gao, T., Zhang, Y., Shi, J., Mohamed, S. R., Xu, J., and Liu, X. 2021. The Antioxidant Guaiacol Exerts Fungicidal Activity Against Fungal Growth and Deoxynivalenol Production in *Fusarium graminearum*. *Frontiers in Microbiology*. (12): 1-10.
- Gotama, B., dan Mahfud. 2015. Pengaruh Teknik Seeding terhadap Yield Kristal pada Kristalisasi Patchouli Alcohol dari Minyak Nilam. *Seminar Nasional Teknologi (SENATEK)*. 19.
- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. 2019. Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (X-RD) di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*. 1(1): 44-51.
- Halimatuddahlia. 2003. *Pencegahan Korosi dan Scale pada Proses Produksi Minyak Bumi*. Laporan Penelitian Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Harnani, E. D. 2010. Perbandingan Kadar Eugenol Minyak Atsiri Bunga Cengkeh (*Syzygium aromaticum* (L.) Meer. dan Perry) dari Maluku, Sumatera, Sulawesi, dan Jawa dengan metode GC-MS (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta). *Skripsi*. Universitas Muhammadiyah Surakarta Repository.
- Hasibuan, R., Limbong, Y. W., Fazillah, R., and Pramananda, V. 2024. Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Liquid Smoke Yield in Coconut (*Cocos nucifera* L.) Shells Pyrolysis Process. *In E3S Web of Conferences*. 560: 1-4.
- Hasson, D., and Semiat, R. 2006. Scale Control in Saline and Wastewater Desalination. *Israel journal of chemistry*. 46(1): 97-104.
- Himawati, E. 2010. Pengaruh Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa destilasi dan Redestilasi Terhadap Sifat Kimia, Mikrobiologi, dan Sensoris Ikan Pindang Layang (*Decapterus spp*) Selama Penyimpanan. *Skripsi*. Jurusan Teknologi Hasil Pertanian. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.

- Hu, B., Zhang, Z. X., Xie, W. L., Liu, J., Li, Y., Zhang, W. M., and Lu, Q. 2022. Advances on the fast pyrolysis of biomass for the selective preparation of phenolic compounds. *Fuel Processing Technology*. 237: 107465.
- Jaya, Y. A. V. 2020. Studi Efektivitas Penambahan Asap Cair Sabut Kelapa sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) *Skripsi*. Jurusan Kimia FMIPA. Universitas Lampung. Lampung.
- Jayanudin, J., Suhendi, A., Uyun, J., dan Supriatna, A. H. 2012. Pengaruh Suhu Pirolisis dan Ukuran Tempurung Kelapa Terhadap Rendemen dan Karakteristik Asap Cair sebagai Pengawet alami. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*. 8(1): 46-55.
- Jotho, J., Seno, A. B., dan Muryanto, S. 2013. Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Dalam Pipa Beraliran Laminer dengan Parameter Konsentrasi Larutan dan Penambahan Aditif Asam Malat. *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*. 1(1): 94-99.
- Kharin. 2020. Deep Learning for Scanning Electron Microscopy: Synthetic Data for The Nanoparticles Detection. *Ultramicroscopy*. 219: 113125.
- Kistriyani, L., Al Ghifari, M. A. D., Mawaddah, M., and Sari, Y. D. 2018. Invasion of Saturated Vapor Coconut Shell The Transition Obat Merah to Liquid Smoke Coconut Shell as Solutions in The Treatment of Wound Outside. *Technology*. 4(3): 1-10.
- Lestari, D. E. 2008. Kimia Air, Pelatihan Operator dan Supervisor Reaktor Riset. *Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN*. Serpong.
- Lestari, D. E., Sunaryo, G. R., Yulianto, Y. E., Alibasyah, S., dan Utomo, S. B. 2004. Kimia Air Reaktor Riset GA Siwabessy. *Makalah Penelitian P2TRR dan P2TKN BATAN*. Serpong.
- 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.
- Margareta, M. A. H., dan Wonorahardjo, S. 2023. Optimasi metode penetapan senyawa eugenol dalam minyak cengkeh menggunakan gas chromatography–mass spectrum dengan variasi suhu injeksi. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, 6(2): 95-103.
- Merdhah, A. B. B., and Yassin, A. A. M. 2007. Scale Formation in Oil Reservoir During Water Injection at High-Salinity Formation Water. *Journal of Applied Sciences*. 7(21): 3198-3207.

- Mersmann, A., Braun, B., and Löffelmann, M. 2002. Prediction of Crystallization Coefficients of The Population Balance. *Chemical Engineering Science*. 57(20): 4267–4275.
- Muttaqin, R. 2023. Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material: X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder. *Indonesian Journal of Laboratory*. 1(1): 9-16.
- 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.
- Nuraeni, W., Daruwati, I., Widyasari, E. M., dan Sriyani, M. E. 2013. Verifikasi Kinerja Alat Particle Size Analyzer (PSA) Horiba LB-550 untuk Penentuan Distribusi Ukuran Nanopartikel. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR*. 266-271.
- 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.
- Pratama, A. S. C., dan Sa'diyah, K. 2022. Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Asap Cair Melalui Metode Pirolisis. *Distilat : Jurnal Teknologi Separasi*. 8(1): 36-44.
- Rabizadeh, T., Peacock, C. L., and Benning, L. G. 2014. Carboxylic Acids: Effective Inhibitors for Calcium Sulfate Precipitation. *Mineralogical Magazine*. 78(6): 1465-1472.
- Raharjo, S. 2020. *Pembentukan Pengendalian Kerak Mineral di dalam Pipa*. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Rahmadyo, N. A., Dini, C., dan Samsudi, R. 2017. Perbandingan Analisa Kinetika Reaksi Pembentukan Kerak CaCO_3 menggunakan Persamaan Arrhenius dan Analisa Differensial Scanning Calorimetry (DSC). *Prosiding Seminar Nasional Publikasi Hasil-Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*. 64-71.
- Rani, S. R. A. 2022. Studi Analisis Data Difraksi Sinar-X Pada Material Zircon Pasir Alam Melalui Metode Rietveld. *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya*. 9(1): 16-22.
- Rout, T. K. 2013. *Pyrolysis of coconut shell (Doctoral dissertation)*. Department of Chemical Engineering. National Institute of Technology. Rourkela.

- Salimin, Z., dan Gunandjar. 2007. Utilization of EDTA as Scale Inhibitor on Evaporation of Liquid Radioactive Waste. In *Proceedings of the Scientific Meeting and Presentation on Basic Research in Nuclear of the Science and Technology part III: Radioactive Waste Management and Environment*. 76-81.
- Saputra, R. Y., Naswir, M., dan Suryadri, H. 2020. Perbandingan Karakteristik Asap Cair Pada Berbagai Grade dari Pirolisis Batubara. *Jurnal Engineering*. 2(2): 96-108.
- Sari, N. W., Fajri, M. Y., dan Wilapangga, A. 2018. Analisis Fitokimia dan Gugus Fungsi dari Ekstrak Etanol Pisang Goroho Merah (*Musa Acuminata* (L)). *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*. 2(1): 30-34.
- Sediono, W., Bayuseno, A. P., dan Muryanto, S. 2011. Eksperimen Pembentukan Kerak Gypsum dengan Konsentrasi Ca^{2+} : 3500 ppm dan Aditif Fe^{2+} . *Jurnal Ilmiah Momentum*. 7(2): 41-44.
- Septiano, A. F., Susilo, S., dan Setyaningsih, N. E. 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): 81-85.
- Setyaningsih, N. E., dan Septiano, A. F. 2019. Optimasi Kualitas Citra Scanning Electron Microscopy (SEM) dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). In *Prosiding Seminar Nasional IV Hasil Penelitian Pranata Laboratorium Pendidikan Indonesia*. IV-ISSN (pp. 2548-1924).
- Sinambela, F., Windarti, T., dan Parsaroan. 2012. Pengaruh Waktu pada Pembentukan Kalsium Fosfat dengan. *Journal of Scientific and Applied Chemistry*. 15(3): 105–110.
- Sousa, M. F. B., and Bertran, C. A. 2014. New Methodology Based on Static Light Scattering Measurements for Evaluation of Inhibitors for in Bulk CaCO_3 Crystallization. *Journal of Colloid and Interface Science*. 420: 57–64.
- Suharso, B., Suhartati, T., dan Aprilia, L. 2007. Sintesis C-Metil-4, 10, 16, 22-Tetrametoksi Kaliks [4] Arena dan Peranannya Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Laporan Akhir Program Insentif*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suharso, Buhani, Bahri, S., and T. Endaryanto. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as a Green Inhibitor of Calcium Sulfate (CaSO_4) Scale Formation. *Asian Journal of Research in Chemistry*. 3(1): 183-187.
- 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 dan Buhani. 2015. *Penanggulangan Kerak*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung. Bandar Lampung. 1-58.
- Suharso, Buhani, dan Tugiono. 2015. Pembuatan Senyawa Turunan Kaliksarena untuk Inhibitor Kerak Material Anorganik. *Prosiding Semirata 2015 Bidang MIPA BKS-PTN Barat*. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 197-206.
- 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.
- Suryadi. 2011. Sintesis dan Karakterisasi Biomaterial Hidroksiapatit dengan Proses Pengendapan Basah. *Tesis*. Fakultas Teknik. Universitas Indonesia. Depok.
- Swastawati, F., Riyadi, P. H., Mulyono, M., Nugraheni, A., Muniroh, M., dan Hidayati, A. N. 2022. Effectiveness of liquid smoke as a source of acetic acid in lowering heavy metals levels in blood cockle (*Anadara granosa*). *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1036 (1): 1-9.
- 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.
- Vasyliiev, G., Vorobyova, V., and Zhuk, T. 2020. Raphanus sativus L. Extract as a Scale and Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Tap Water. *Journal of Chemistry*. 2020(1): 5089758.
- Vendamawan, B. 2016. Pembentukan Kerak CaCO_3 - CaSO_4 Dengan Konsentrasi Ca^{2+} 2000 ppm pada Suhu 30 °C dan 40 °C dalam Pipa Beraliran Laminar. *Skripsi*. Program Studi Teknik Mesin. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Vuppiladadiyam, A. K., Vuppiladadiyam, S. S. V., Sikarwar, V. S., Ahmad, E., Pant, K. K., Pandey, A., and Leu, S. Y. 2023. A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*. 108: 1-19.
- Wang, R., Wang, G., Yan, Y., Sabeghi, M., Ming, Z., Allen, J. K., and Mistree, F. 2019. Ontology-based representation of meta-design in designing decision workflows. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 19(1): 1-19.
- Wang, C., Lei, H., Zhao, Y., Qian, M., Kong, X., Mateo, W., and Ruan, R. 2021. Integrated harvest of phenolic monomers and hydrogen through catalytic pyrolysis of biomass over nanocellulose derived biochar catalyst. *Bioresource Technology*. 320: 124352.

Widianto, E., Kardiman, K., Bayuseno, A. P., dan Muryanto, S. 2017. Identifikasi Struktur Kristal dan Morfologi Endapan Kalsium Karbonat (CaCO_3) pada Pipa Tembaga. *Barometer*. 2(2): 60-63.

Whitten, K. W., Davis, R. E., Peck, M. L., and Stanley, G. G. 2014 . *Chemistry*. 10th Edition. Mary Finch. USA.