

**STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR
KALSIUM KARBONAT (CaCO_3) MENGGUNAKAN METODE *SEDED*
*EXPERIMENT***

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD SANDI NUGRAHA



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR KALSIUM KARBONAT (CaCO₃) MENGGUNAKAN METODE *SEEDED EXPERIMENT*

Oleh

Muhammad Sandi Nugraha

Perindustrian dalam bidang minyak bumi berkembang pesat di Indonesia sering mengalami permasalahan seperti pengerasan. Salah satu kerak yang terbentuk pada pipa-pipa industri adalah kalsium karbonat (CaCO₃). Kerak pada pipa-pipa industri akan memperkecil diameter dan menghambat aliran fluida dapat menyebabkan pipa tersebut pecah. Penelitian ini dilakukan dengan pengujian inhibitor limbah cair tempe pada kalsium karbonat (CaCO₃) menggunakan *seeded experiment*. Pada variasi konsentrasi larutan pertumbuhan 0,05; 0,075; dan 0,1 M serta variasi inhibitor 5, 15, 25, 35, dan 45%. Optimasi waktu simpan inhibitor dilakukan pada variasi waktu simpan 1, 3, dan 7 hari. Limbah cair tempe dengan waktu simpan 1 hari digunakan sebagai inhibitor. Efektifitas tertinggi terdapat pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,05 M dan konsentrasi inhibitor 45%, diperoleh persen efektifitas sebesar 73,88%. Limbah cair tempe dianalisis menggunakan *high performance liquid chromatography* (HPLC) dan *spectrophotometer infrared* (IR) dengan diperoleh hasil bahwa limbah cair tempe mengandung asam laktat dan terdapat gugus OH-hidroksi dan CO-karbonil. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa kerak CaCO₃ tanpa penambahan inhibitor terdiri dari kristal fasa kalsit dan aragonit, sedangkan setelah penambahan inhibitor menjadi lebih rapuh dan terdiri dari kristal fasa kalsit, aragonit dan vaterit. Analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel kerak CaCO₃ menjadi lebih kecil dengan adanya penambahan inhibitor

Kata kunci : Kerak, CaCO₃, inhibitor, limbah cair tempe

ABSTRACT

STUDY OF ADDITION OF WASTE TEMPE AS AN INHIBITOR OF CALCIUM CARBONATE (CaCO₃) SCALE USING SEEDED EXPERIMENT METHOD

By

Muhammad Sandi Nugraha

The industry in the petroleum sector is growing rapidly in Indonesia, often experiencing problems such as displacement. One of the scales formed on industrial pipes is calcium carbonate (CaCO₃). Scale on industrial pipes will reduce the diameter and impede the flow of fluids which can cause the pipe to burst. This research was conducted by testing the inhibitor of tempe liquid waste on calcium carbonate (CaCO₃) using a seeded experiment. At the concentration variation of the growth solution 0.05; 0.075; and 0.1 M and inhibitor variations of 5, 15, 25, 35, and 45%. The optimization of the inhibitor storage time was carried out at variations of 1, 3, and 7 days of storage time. Tempe liquid waste with a storage time of 1 day was used as an inhibitor. The highest effectiveness was found in growth solution concentration of 0.05 M and inhibitor concentration of 45%, the percentage of effectiveness was 73.88%. Tempe liquid waste was analyzed using high performance liquid chromatography (HPLC) and infrared spectrophotometer (IR) with the results obtained that tempe liquid waste contains lactic acid and contains OH-hydroxy and CO-carbonyl groups. Analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) showed that the CaCO₃ crust without the addition of inhibitor consisted of calcite and aragonite crystals, whereas after the addition of inhibitors it became more brittle and consisted of calcite, aragonite and vaterite crystals. Analysis using the Particle Size Analyzer (PSA) showed that the particle size distribution of the CaCO₃ scale became smaller with the addition of inhibitors.

Key words : Scale, CaCO₃, inhibitor, Tempe Liquid Waste

**STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR
KALSIUM KARBONAT (CaCO_3) MENGGUNAKAN METODE *SEDED*
*EXPERIMENT***

Oleh

MUHAMMAD SANDI NUGRAHA

Skripsi

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

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

Judul Skripsi : **STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE
SEBAGAI INHIBITOR KALSIMUM KARBONAT
(CaCO₃) MENGGUNAKAN METODE *SEDED
EXPERIMENT***

Nama Mahasiswa : **Muhammad Sandi Nugraha**

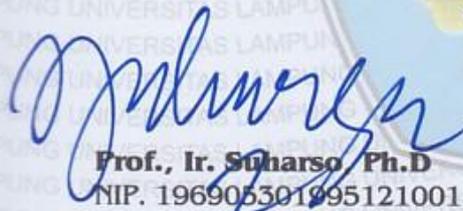
NPM : **1717011021**

Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

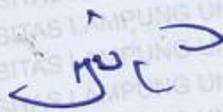


1. Komisi Pembimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


Mulyono, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197406112000031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

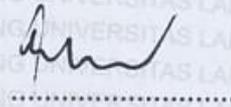
Ketua : Prof. Ir. Suharso, Ph.D



Sekretaris : Prof. Dr. Buhani, M.Si



**Penguji
Bukan Pembimbing : Drs. R. Supriyanto, M.S**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng Surtpto Dwi Yuwono, M.T
NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 30 September 2021

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Sandi Nugraha
Nomor Pokok Mahasiswa : 1717011021
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "Studi Penambahan Limbah Cair Tempe Sebagai Inhibitor Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode *Seeded Experiment*" ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bender Lampung, September 2021
takan

709AJX443937197
Muhammad Sandi Nugraha
NPM. 1717011021

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Muhammad Sandi Nugraha dilahirkan di Trimurjo pada tanggal 22 Juni 1999. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Hedi Iswara dan Ibu Listyaningsih. Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak Bina Putra dan lulus pada tahun 2005 kemudian melanjutkan pendidikan di SDN 1 Trimurjo dan lulus pada tahun 2011. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Trimurjo dan lulus pada tahun 2014. kemudian melanjutkan pendidikan di SMAN 2 Metro dan lulus pada tahun 2017. Penulis aktif mengikuti kegiatan ekstrakurikuler pada saat menempuh pendidikan di SMA yang meliputi sebagai anggota aktif Palang Merah Remaja pada periode 2014/2015. Pada tahun 2017 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis mengikuti aktivitas organisasi dimulai dengan menjadi Kader Muda Himaki (KAMI) yang kemudian terpilih menjadi anggota Pengurus Muda Biro Penerbitan pada periode 2017/2018 dan menjadi Pengurus Inti Biro Kesekretariatan pada periode 2018/2019. Penulis menyelesaikan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Sinar Sekampung, Kecamatan Air Naningan, Kabupaten Tanggamus pada Januari – Februari 2020, kemudian penulis menyelesaikan Kerja Praktik di Laboratorium

Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung dengan judul Studi Penambahan Limbah Cair Tempe sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) dengan Menggunakan Metode *Seeded Experiment* pada Desember 2020.

MOTTO

**“When you hit rock bottom, you still have a way to go until the abyss..”
(Tokyo From Money Heist)**

**“The world isn't perfect. But it's there for us, doing the best it can, that's what makes it so beautiful.”
(Roy Mustang)**

**“We are all like fireworks: we climb, we shine and always go our separate ways and become further apart. But even when that time comes, let's not disappear like a firework and continue to shine forever.”
(Hitsugaya Toshiro)**

**“Those who stand at the top determine what's wrong and what's right! This very place is neutral ground! Justice will prevail, you say? But of course it will! Whoever wins this war becomes justice.”
(Don Quixote Doflamingo)**

**“Fear is not evil. It tells you what weakness is. And once you know your weakness, you can become stronger as well as kinder.”
(Gildarts Clive)**



Alhamdulillah rabbil 'alamin

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayahnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang ku persembahkan kepada :

Terimakasih untuk orangtuaku dan teman-temanku. Dengan dukungan mereka penulis bisa menyelesaikan skripsi dengan lancar dan berkah. Terimakasih karena telah mendoakan, menyemangati, menolong, melindungi, dan memberi kasih sayang tiada hentinya.

Dengan rasa hormat saya, Prof., Ir. Suharso, Ph.D, Prof., Buhani, M.Si, Drs. R. Supriyanto, M.S., Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., serta bapak dan ibu dosen Jurusan Kimia atas ilmu yang diberikan.

Sahabat dan teman-temanku semua yang telah memberikan semangat, kebahagiaan, dan keceriaan kepada penulis.

Serta almamterku tercinta

SANWACANA

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT Tuhan semesta alam yang telah memberikan segala bentuk rahmat dan nikmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Baginda Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabat, semoga kita termasuk umat yang beliau cintai dan mendapatkan *syafa'at* beliau di *yaumul akhir* nanti, *aamiin yaarabbal'alamiin*.

Skripsi dengan judul "**Studi Penambahan Limbah Cair Tempe sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO₃) menggunakan Metode *Seeded Experiment***" merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Teriring doa yang tulus, penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua penulis, Ibu Listiyaningsih dan Bapak Maryoto juga Almarhum Bapak Hedi Iswara yang telah memberikan segala usaha dan doa, cinta dan kasih sayang, dukungan moral dan spiritual yang sampai saat ini tak pernah berhenti. Bapak Ibu terimakasih atas segala kasih sayang yang tak terhingga untuk penulis. Semoga Allah selalu memberikan nikmat sehat, nikmat rezeki,

dan kebahagiaan dunia serta akhirat kepada Bapak dan Ibu *aamiin*
yaarabbal'alamiin.

2. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D selaku pembimbing I atas segala kebaikan, ilmu, motivasi, pengalaman, kritik, saran, kesabaran, dan bimbingannya sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik. Atas semua yang telah beliau berikan, semoga Allah SWT senantiasa memberikan keberkahan. *Aamiin*.
3. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si selaku pembimbing II atas segala saran, nasihat, kesabaran, keikhlasan, bimbingan dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis dalam penyelesaian penelitian dan skripsi ini. Semoga Allah senantiasa memberikan ridho-Nya dan membalas semuanya dengan kebaikan.
4. Bapak Drs. R Supriyanto, M.S selaku pembahas atas segala bimbingan, kritik, saran, kesabaran dan ilmu bermanfaat yang telah diberikan kepada penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga Allah SWT memberikan keberkahan atas semua yang telah Ibu berikan.
5. Ibu Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si selaku pembimbing akademik, penulis mengucapkan terimakasih banyak atas bimbingan, perhatian, nasehat, motivasi, dan kesabaran dalam membimbing penulis terkait permasalahan akademik selama masa perkuliahan ini.
6. Bapak Mulyono, Ph.D selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Prof. Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, M.T. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung beserta jajarannya.

8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia, FMIPA Unila atas seluruh ilmu, bimbingan, perhatian dan pengalaman yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini dengan baik serta terimakasih kepada staff administrasi Jurusan Kimia FMIPA Unila yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan persyaratan administrasi selama kuliah. Semoga Allah SWT senantiasa membalas kebaikan dan jasa-jasa Bapak serta Ibu sekalian.
9. Ibu Dr. Kamisah D. Pandiangan, S.Si., M.Si selaku Kepala Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik atas izin penggunaan laboratorium yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan baik.
10. Mba Liza Apriliya selaku Laboran Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik yang telah banyak memberikan arahan, dan membantu penulis dalam penyediaan alat untuk penelitian.
11. *Scale squad*, Muhammad Fauzan, Dewi Gustina Sari, dan Nurul Rosadinah, terimakasih atas kerjasama, pengalaman, kritik, saran, bantuan, dan kepeduliannya selama penelitian. Semoga kita bisa sukses dan sama-sama berhasil meraih apa yang kita cita-citakan selama ini.
12. Sahabat Penten-3-On, Dewi Gustina Sari, Eva Melisa, Erma Marlita dan, Renny Andrelia Antika terimakasih atas kebersamaan yang diberikan, semoga cepet selesai penelitiannya dan semoga Allah selalu melindungi dan memudahkan langkah kita menuju kesuksesan.
13. Teman yang mengulang Analitik 2, Andre dan Ikrom, terimakasih atas kebersamaan saat menulis laporan dan pengalaman ngulang analitik 2 dan analitik 3 bareng adik tingkat hingga menjalani perkuliahan. *See you guys.*

14. Teman Renang , Jeremia dan Rusydi. Semoga bisa bertemu kembali di kolam lain.
15. Teman-teman Kimia A'17, terimakasih atas kebersamaan dan kekompakkan yang diberikan selama perkuliahan. Semoga kita masih bisa dipertemukan lagi di lain kesempatan.
16. Keluarga besar *Chemistry* 2017, terimakasih atas kebersamaan selama perkuliahan dan sudah menjadi keluarga baru bagi penulis. Semoga kita semua dimudahkan dalam berkarir setelah lulus dari Kimia ini.
KOLABORASI KARYA LUAR BIASA.
17. Shakila Larasati AM, Semoga bisa terus bersama tanpa batas waktu.
18. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Terimakasih atas segala ketulusan dan doa, semoga kebaikan yang sudah diberikan selama ini mendapat balasan dari Allah SWT.

Bandar Lampung, September 2021
Penulis,

Muhammad Sandi Nugraha

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
C. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
A. Kristal	5
B. Kerak	6
C. Faktor Pembentukan Kristal	8
1. Kristalisasi	9
2. Kelarutan Endapan	10
3. Derajat Lewat Jenuh	11
D. Pembentukan Kerak	12
1. Pembentukan Inti	13
2. Pertumbuhan Inti	13
3. Pengendapan	13
E. Kalsium Karbonat (CaCO_3)	14
1. Pengaruh Terbentuknya Kerak (CaCO_3)	16
F. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak (CaCO_3)	16
1. Pengendalian pH	17
2. Pembebasan Mineral Air	18
3. Pelunakan Zeolit	18

4. Penggunaan Inhibitor Kerak	19
G. Mekanisme Inhibitor Kerak	21
1. Penghambat Ambang Batas	21
2. Khelat	22
3. Distorsi Kristal.....	23
4. Dispersi Kristal	24
H. Limbah Tempe.....	25
1. Bakteri Asam Laktat.....	27
I. Metode <i>Seeded Experiment</i>	28
J. Spektrofotometri Infra Merah (IR)	28
K. <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC)	29
L. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	31
M. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	33
N. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	35
III. METODE PENELITIAN	37
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
B. Bahan dan Alat.....	37
C. Prosedur Penelitian	38
1. Pembuatan Limbah Cair Tempe	38
2. Pembuatan Inhibitor	38
3. Pembuatan Bibit Kristal	38
4. Optimasi Waktu Simpan Inhibitor.....	39
5. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaCO_3	39
6. Analisa Data.....	41
D. Diagram Alir	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
A. Analisis Gugus Fungsi Limbah Cair Tempe Menggunakan Spektrofotometer <i>Infra Red</i> (IR).....	43

B. Analisis Kandungan Senyawa Limbah Cair Tempe Menggunakan Performance Liquid Chromatography (HPLC).....	45
C. Optimasi Waktu Simpan Inhibitor.....	47
D. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaCO_3 Tanpa Inhibitor dengan Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan Menggunakan <i>Metode Seeded Experiment</i>	50
E. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaCO_3 dengan Penambahan Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan <i>Metode Seeded Experiment</i>	51
1. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaCO_3 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,05 M.....	52
2. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaCO_3 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,075 M.....	54
3. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaCO_3 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,1 M.....	57
F. Perbandingan Larutan Pertumbuhan CaCO_3	59
G. Analisis Permukaan Kerak CaCO_3 Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	61
H. Analisis Distribusi Ukuran Partikel CaCO_3 dengan PSA	63
I. Analisis Struktur Kristal CaCO_3 Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	65
V. SIMPULAN DAN SARAN	69
A. Simpulan	69
B. Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	79

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai supersaturasi.....	16
2. Analisis kadar hara limbah cair tempe	26
3. Gugus Fungsi Limbah Cair Tempe pada Hasil Analisis IR	45
4 Hasil Analisis HPLC limbah cair tempe.	46
5. Nilai pH Inhibitor dengan Variasi Waktu Simpan.....	48
6. Nilai pH pada Variasi Konsentrasi Inhibitor Limbah Cair Tempe	51
7. Nilai pH pada Variasi Konsentrasi Inhibitor Limbah Cair Tempe serta Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan	52
8. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan CaCO ₃ 0,05 M.....	54
9. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan CaCO ₃ 0,075 M.....	56
10. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan CaCO ₃ 0,1 M.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. (a). Susunan atom kristal, (b). Susunan atom amorf.....	6
2. Kerak Pada Pipa.....	8
3. Tahapan kristalisasi.....	10
4. Diagram temperatur konsentrasi.....	11
5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan.....	20
6. Mekanisme Penghambatan Inhibitor (a) Threshold inhibition, (b) Crystal dispersion, (c) Crystal distortion	24
7. Skema Kerja <i>Spectrophotometer InfraRed (IR)</i>	29
8. Diagram blok HPLC	31
9. Skema bagan SEM.....	32
10. Morfologi kerak CaCO ₃ fase kalsit, aragonit, dan vaterit	33
11. Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf	34
12. Skema kerja alat XRD.....	36
13. Diagram Alir Penelitian.....	42
14. Spektrum IR Limbah Cair Tempe.....	44
15. Hasil analisis HPLC limbah cair tempe.	47
16. Grafik perbandingan laju pertumbuhan kristal CaCO ₃ pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,05 M tanpa inhibitor dan konsentrasi inhibitor 25% dengan variasi waktu simpan inhibitor.....	48
17. Grafik perbandingan laju pertumbuhan kristal CaCO ₃ tanpa inhibitor dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan.....	50

18. Grafik laju pertumbuhan CaCO_3 dengan menggunakan variasi konsentrasi inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,05 M.	53
19. Grafik laju pertumbuhan CaCO_3 dengan menggunakan variasi konsentrasi inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,075 M.	55
20. Grafik laju pertumbuhan CaCO_3 dengan menggunakan variasi konsentrasi inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 M.	57
21. Perbandingan larutan pertumbuhan CaCO_3 pada konsentrasi 0,05 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor pada konsentrasi 35%.	60
22. Perbandingan kristal CaCO_3 pada konsentrasi 0,05 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor pada konsentrasi 35%.	60
23. Morfologi kerak CaCO_3 pada konsentrasi 0,05 M dengan pembesaran 5.000 \times (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor 35%.	61
24. Morfologi kerak CaCO_3 pada konsentrasi 0,05 M dengan pembesaran 3.000 \times (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor 35%.	62
25. Grafik distribusi ukuran partikel CaCO_3	64
26. Pola XRD kerak CaCO_3 pada konsentrasi 0,05 M tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor 35%.	65

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri merupakan bidang yang penting dalam perekonomian suatu negara, hal ini mendorong perkembangan industrialisasi di dunia. Indonesia merupakan ladang perindustrian karena memiliki sumber daya alam yang melimpah, contohnya adalah minyak bumi. Industri perminyakan selalu menggunakan pipa sebagai saluran perpindahan minyak dari satu tempat ke tempat lain. Aliran fluida pada pipa-pipa ini sering terganggu akibat terbentuknya endapan yang disebut kerak (*scale*). Kerak didefinisikan sebagai tumpukan keras dari bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air (Bhatia, 2003). Pada industri perminyakan kerak dapat terjadi misal pada lubang sumur, rangkaian pompa dalam sumur, *casing*, *flow line*, *manifold*, separator, tangki, dan peralatan produksi lainnya (Syahri dan Sugiharto, 2008).

Pengendapan pada pipa-pipa tersebut disebabkan oleh senyawa pembentuk kerak dalam air yang jumlahnya melebihi kelarutannya pada keadaan setimbang. Kerak yang terbentuk pada pipa-pipa akan memperkecil diameter dan menghambat aliran fluida pada sistem pipa tersebut. Ini akan menyebabkan suhu semakin naik dan tekanan semakin tinggi sehingga kemungkinan pipa akan pecah (Asnawati, 2001). Secara prinsip, Pembentukan kerak terjadi dalam suatu aliran yang mengandung garam, jika mengalami penurunan tekanan secara tiba-tiba, maka aliran tersebut akan menjadi lewat jenuh dan menyebabkan terjadinya endapan garam yang menumpuk pada dinding-dinding peralatan proses industri. Penumpukan endapan garam ini

umumnya terdiri dari kalsium sulfat, fosfat dan karbonat (Amjad, 1987). Reaksi kimia antara kandungan-kandungan zat yang tidak dikehendaki dan terdapat dalam air juga dapat mengakibatkan proses pengerakan ini. Kandungan tersebut meliputi alkalin, kalsium, klorit, sulfat, nitrat, besi, seng, tembaga, fosfat, dan aluminium.

Pembentukan kerak (*scale*) ini menyebabkan sumur pipa pada industri perusahaan minyak negara (Pertamina, Tbk) hanya berumur 10 tahun hingga akhirnya terjadi penimbunan kerak, sehingga perusahaan harus membuat kembali sumur pipa dengan biaya 6-7 juta dolar per sumur atau setara dengan Rp 80-90 milyar. Akibatnya biaya dan kerugian yang ditimbulkan sangat besar untuk operasional biaya perawatan (Suharso *et al.*, 2010; Suharso *et al.*, 2014; Suharso *et al.*, 2017; Suharso *et al.*, 2017a; Suharso *et al.*, 2019a). Sehingga banyak perusahaan membuat penelitian untuk menanggulangi masalah ini, salah satu metode adalah menggunakan inhibitor. Inhibitor kerak merupakan suatu zat yang dapat menghentikan atau mencegah terbentuknya kerak. Penggunaan inhibitor ini sangat menarik, karena dengan konsentrasi di bawah 100 ppm sudah dapat mencukupi untuk mencegah kerak dalam periode yang cukup lama (Halimatuddahlia, 2003).

Metode pencegahan pembentukan kerak dengan inhibitor lebih sering digunakan karena lebih efektif, stabil, murah, dan aman, dibanding metode lain yang dapat dilakukan seperti pengendalian pH dan pelunakan dan pembebasan mineral air. Pengendalian pH dilakukan dengan menginjeksikan asam (asam sulfat atau asam klorida). Proses penghilangan kerak menggunakan asam dengan konsentrasi tinggi juga tidak efektif karena dapat meningkatkan laju korosi dan konduktivitas, serta mempunyai tingkat bahaya yang cukup tinggi dalam penanganannya (Lestari, 2008). Pembentukan kerak dapat dicegah dengan cara pelunakan dan pembebasan mineral air, akan tetapi penggunaan air bebas mineral dalam industri-industri besar membutuhkan biaya yang lebih tinggi (Nunn, 1997). Adapun faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan inhibitor kerak adalah keefektifan, kestabilan, kecocokan, dan biaya. Sifat dari inhibitor kerak yang sangat diharapkan yaitu stabil dalam air serta dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama dan pada temperatur

tinggi (Cowan dan Weinttritt, 1976). Beberapa penelitian yang telah dilakukan menggunakan tumbuh-tumbuhan sebagai inhibitor kerak karena dapat diperoleh dengan mudah dan juga ramah lingkungan. Ekstrak gambir yang dikombinasikan dengan kemenyan putih dan aditif golongan karboksilat 350 ppm dengan persentase efektivitas tertinggi yaitu 64,34% sebagai inhibitor kerak (Aisah, 2016). Tanaman gambir (*Uncaria gambier roxb*) dapat digunakan sebagai inhibitor kerak CaCO_3 karena mengandung 70% senyawa tanin (Bakhtiar, 1991). Selain ekstrak gambir juga digunakan asap cair tempurung kelapa grade 2 350 ppm sebagai inhibitor dalam mencegah pertumbuhan kerak CaCO_3 dengan persentase efektivitas tertinggi yaitu 99,48% (Kurniawan, 2018). Pada penelitian sebelumnya juga digunakan asap cair yang terbuat dari pelepah sawit memiliki kandungan asam organik (asam karboksilat), fenol, aldehyd, keton, dan ester. Kandungan utamanya adalah asam asetat sebesar 52,19% (Rahmalinda *et al.*, 2014). Adanya kandungan asam organik yang cukup tinggi tersebut memungkinkan asap cair pelepah sawit untuk dikembangkan sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4) dan kalsium karbonat (CaCO_3) (Suharso *et al.*, 2019a). Salah satu asam organik yaitu asam laktat yang bisa dihasilkan oleh bakteri asam laktat yang banyak terdapat pada limbah cair tempe atau produk samping hasil fermentasi lainnya. Limbah adalah buangan yang dihasilkan dari suatu proses industri maupun domestik (rumah tangga), yang lebih di kenal sebagai sampah, yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki lingkungan karena tidak memiliki nilai ekonomis dan jika dimanfaatkan dengan tepat maka akan mengurangi pencemaran lingkungan dan menghilangkan sumber penyakit (Said, 1999). Bakteri asam laktat adalah kelompok bakteri yang menghasilkan asam laktat sebagai produk utama dari fermentasi karbohidrat atau gula (Ray, 2001).

Pada penelitian ini, inhibitor yang digunakan yaitu limbah cair tempe. Limbah cair tempe mengandung asam laktat diharapkan bisa digunakan untuk menghambat laju pertumbuhan kerak. Oleh karena itu, pada penelitian ini mempelajari efektifitas limbah cair tempe sebagai inhibitor pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3)

dengan metode *seeded experiment*. Analisis kandungan limbah cair tempe menggunakan Spektrofotometri Infra Merah dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) sedangkan analisis morfologi kerak CaCO_3 menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD), serta untuk mengetahui distribusi ukuran partikelnya akan diukur menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA).

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui kandungan senyawa pada limbah cair tempe yang berpengaruh untuk menghambat pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) melalui karakterisasi menggunakan HPLC dan IR.
2. Mengetahui efektivitas limbah tempe sebagai inhibitor kerak kalsium karbonat (CaCO_3) melalui analisis data dan karakterisasi kerak kalsium karbonat (CaCO_3) menggunakan SEM, PSA, dan XRD.

C. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

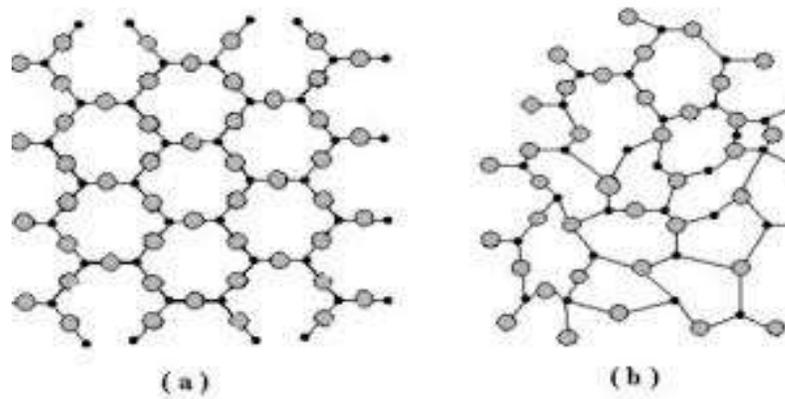
1. Memberikan informasi tentang efektivitas dan pengaruh penambahan limbah tempe sebagai inhibitor pembentukan kerak CaCO_3 .
2. Membantu penghematan biaya penggantian pipa industri-industri dalam penanganan kerak apabila penelitian ini ditindaklanjuti nantinya.
3. Memberi kontribusi pada upaya pengurangan polutan organik, khususnya limbah cair tempe (kecutan) di lingkungan perairan maupun daratan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kristal

Kristal didefinisikan sebagai komposisi atom-atom zat padat yang memiliki susunan teratur dan periodik dalam pola tiga dimensi. Keteraturan susunan tersebut terjadi karena kondisi geometris yang harus memenuhi adanya ikatan atom yang berarah dan susunan yang rapat. Pada hubungan lokal yang teratur, suatu kristal harus memiliki rentang yang panjang pada koordinasi atom-atom atau ion dalam pola tiga dimensi sehingga menghasilkan rentang yang panjang sebagai karakteristik dari bentuk kristal tersebut (Dwi dan Handayani, 2012).

Kristal terbentuk dari komposisi atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul zat padat yang memiliki susunan berulang dan jarak yang teratur dalam tiga dimensi. Pada hubungan lokal yang teratur, suatu kristal harus memiliki rentang yang panjang pada koordinasi atom-atom atau ion dalam pola tiga dimensi sehingga menghasilkan rentang yang panjang sebagai karakteristik dari bentuk kristal tersebut. Berdasarkan struktur atom penyusunnya, bahan padat dibedakan menjadi tiga yaitu kristal tunggal (*monocrystal*), polikristal (*polycrystal*), dan amorf (Smallman dan Bishop, 2000). Struktur amorf menyerupai pola hampir sama dengan kristal, akan tetapi pola susunan atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul yang dimiliki tidak teratur dengan jarak yang berdekatan. Amorf terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat sehingga atom-atom tidak dapat dengan tepat menempati lokasi kisinya. Susunan dua-dimensional simetris dari dua jenis atom yang berbeda antara kristal dan amorf ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a). Susunan atom kristal, (b). Susunan atom amorf (Smallman and Bishop, 2000).

Pada kristal tunggal, atom atau penyusunnya mempunyai struktur tetap karena atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya tersusun secara teratur dalam pola tiga dimensi dan pola-pola ini berulang secara periodik dalam rentang yang panjang tak berhingga. Polikristal dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari kristal-kristal tunggal yang memiliki ukuran sangat kecil dan saling menumpuk yang membentuk benda padat.

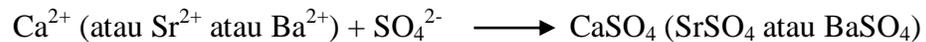
B. Kerak

Kerak adalah suatu deposit keras dari senyawa anorganik yang sebagian besar terjadi pada permukaan peralatan penukar panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air (Bhatia, 2003). Kerak juga didefinisikan sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi (Kemmer, 1979). Kerak dapat terbentuk karena campuran air yang digunakan tidak sesuai. Campuran air tersebut tidak sesuai jika air berinteraksi secara kimia dan mineralnya mengendap jika dicampurkan (Badr dan Yassin, 2007). Kerak juga terbentuk karena tercapainya keadaan larutan lewat jenuh. Beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal dalam keadaan larutan

lewat jenuh. Inti kristal ini akan terlarut kembali jika ukurannya lebih kecil dari ukuran partikel kritis sementara itu kristal-kristal akan berkembang bila ukurannya lebih besar dari partikel kritis. Apabila ukuran inti kristal menjadi lebih besar dari inti kritis, maka akan mulailah pertumbuhan kristal, dari kristal kecil membentuk kristal dengan ukuran yang lebih besar (penebalan lapisan kerak). Kristal-kristal yang terbentuk mempunyai muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuklah kerak (Lestari, 2008; Hasson and Raphael, 2005).

Menurut Badr and Yassin (2007), prinsip mekanisme pembentukan kerak, yaitu :

1. Campuran dua air garam yang tidak sesuai (umumnya air formasi mengandung banyak kation seperti kalsium, barium dan stronsium, bercampur dengan sulfat yang banyak terdapat pada air laut, menghasilkan kerak seperti kalsium sulfat (CaSO_4).



2. Penurunan tekanan dan kenaikan temperatur air garam yang akan menurunkan kelarutan garam (umumnya mineral yang paling banyak mengendap adalah kerak karbonat seperti CaCO_3).



3. Penguapan air garam, menghasilkan peningkatan konsentrasi garam melebihi batas kelarutan dan melebihi endapan garam.



Gambar 2. Kerak Pada Pipa (Crabtree *et al*, 1999).

Komponen-komponen kerak yang sering dijumpai pada peralatan industri yaitu kalsium sulfat (CaSO_4), kalsium karbonat (CaCO_3 turunan dari kalsium bikarbonat), kalsium dan seng fosfat, kalsium fosfat, 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).

C. Faktor Pembentukan Kristal

Ukuran kristal yang terbentuk pengendapan, tergantung terutama pada dua faktor penting, yaitu laju pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal.

a. Laju Pembentukan Inti (Nukleasi)

Laju pembentukan inti (nukleasi) dapat dinyatakan dengan jumlah inti yang terbentuk dalam satuan waktu. Jika laju pembentukan inti tinggi, banyak sekali kristal yang akan terbentuk yang terdiri dari partikel-partikel kecil. Laju

pembentukan inti tergantung pada derajat lewat jenuh dari larutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuh maka semakin besar kemungkinan untuk membentuk inti baru sehingga akan semakin besar laju pembentukan inti.

b. Laju Pertumbuhan Kristal

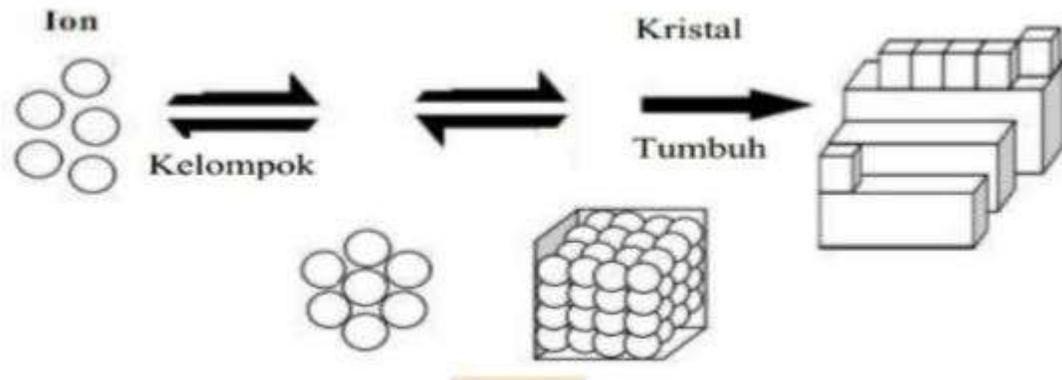
Laju pertumbuhan kristal merupakan faktor penting lainnya yang akan mempengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan berlangsung. Semakin tinggi laju pertumbuhan maka kristal yang terbentuk akan semakin besar. Laju pertumbuhan kristal juga tergantung pada derajat lewat jenuh (Svehla, 1990).

Faktor-faktor pembentukan kristal yaitu:

1. Kristalisasi

Kristalisasi adalah suatu proses pembentukan kristal dari larutannya dan kristal yang dihasilkan dapat dipisahkan secara mekanik. Kristalisasi dari larutan dapat terjadi jika padatan larutan dalam keadaan berlebih (di luar kesetimbangan), maka sistem akan mencapai kesetimbangan dengan cara mengkristalkan padatan terlarut. Kristalisasi senyawa dalam larutan langsung pada permukaan transfer panas dimana kerak terbentuk memerlukan tiga faktor simultan yaitu konsentrasi lewat jenuh (*supersaturation*), terbentuknya inti kristal dan waktu kontak yang memadai (Brown, 1978).

Laju pertumbuhan kristal ditentukan oleh laju difusi zat terlarut pada permukaan kristal dan laju pengendapan zat terlarut pada kristal tersebut. Daya dorong difusi zat-zat terlarut adalah perbedaan antara konsentrasi zat-zat terlarut pada permukaan kristal dan pada larutan. Kristal-kristal yang telah terbentuk mempunyai muatan ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal sehingga terbentuklah kerak (Lestari, 2008; Hasson and Raphael, 2005). Penjelasan sederhana pembentukan kerak (kristalisasi) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan kristalisasi (Zeiher *et al*, 2003).

2. Kelarutan Endapan

Endapan adalah zat yang memisahkan diri sebagai suatu fasa padat dari larutan. Endapan mungkin berupa kristal atau koloid, dan dapat dikeluarkan dari larutan dengan penyaringan atau pemusingan. Endapan terbentuk jika larutan menjadi terlalu jenuh dengan zat bersangkutan. Kelarutan (S) suatu endapan, menurut definisi adalah sama dengan konsentrasi molar dari larutan jenuhnya. Kelarutan bergantung dari berbagai kondisi, seperti temperatur, tekanan, konsentrasi, bahan-bahan lain dalam larutan itu dan pada komposisi pelarutnya.

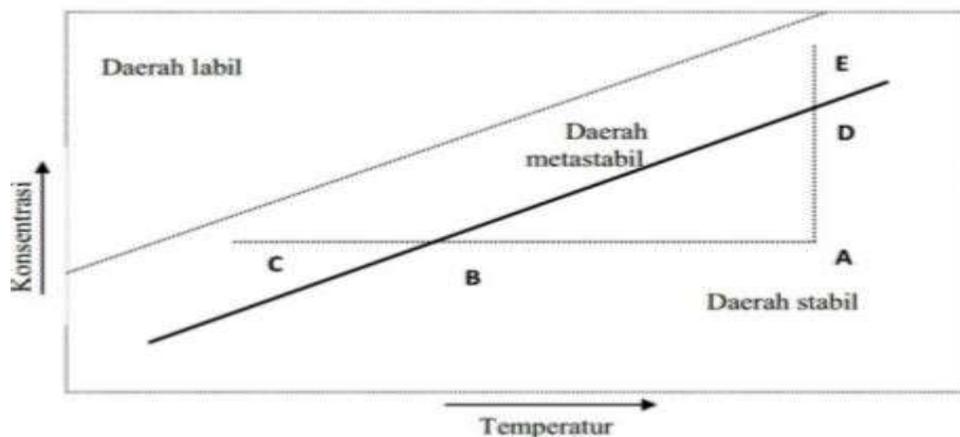
Hasil kali kelarutan memungkinkan kita untuk menerangkan dan juga memperkirakan reaksi-reaksi pengendapan. Hasil kali kelarutan dalam keadaan sebenarnya merupakan nilai akhir yang dicapai oleh hasil kali ion ketika kesetimbangan tercapai antara fasa

padat dari garam yang hanya sedikit larut dalam larutan itu. Jika hasil kali ion berbeda dengan hasil kali kelarutan, maka sistem itu akan berusaha menyesuaikan, sehingga hasil kali ion mencapai nilai hasil kali kelarutan. Jadi, jika hasil kali ion dengan sengaja dibuat lebih besar dari hasil kali kelarutan, penyesuaian oleh sistem mengakibatkan mengendapnya garam larutan. Sebaliknya jika hasil kali ion dibuat lebih kecil dari hasil kali kelarutan, kesetimbangan dalam sistem dicapai kembali

dengan melarutnya sebagian garam padat ke dalam larutan. Hasil kali kelarutan menentukan keadaan kesetimbangan, tetapi tidak memberikan informasi tentang laju ketika kesetimbangan itu terjadi. Sesungguhnya kelebihan zat pengendap yang terlalu banyak dapat mengakibatkan sebagian endapan melarut kembali, sebagai akibat bertambahnya efek garam atau akibat pembentukan ion penjebakan. Dalam hal ini, hasil kali kelarutan dari kalsium sulfat pada temperatur ruang sebesar $2,3 \times 10^{-4}$ mol/L (Svehla, 1990).

3. Derajat Lewat Jenuh

Larutan lewat jenuh adalah larutan yang mengandung zat terlarut lebih besar daripada yang dibutuhkan pada sistem kesetimbangan larutan jenuh. Kondisi kelarutan lewat jenuh dapat diperoleh dengan jalan pendinginan larutan pekat panas, penguapan larutan encer, kombinasi proses penguapan dan pendinginan serta dengan penambahan zat lain untuk menurunkan kelarutannya. Diagram hubungan temperatur-konsentrasi dalam proses kristalisasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram temperatur konsentrasi (Wafiroh, 1995).

Berdasarkan Gambar 4, garis tebal menunjukkan kelarutan normal untuk zat terlarut dalam pelarut, sedangkan garis putus-putus menunjukkan kurva lewat jenuh, dimana posisinya dalam diagram bergantung pada zat-zat pengotor (Wafiroh, 1995). Pada

gambar di atas, kondisi kelarutan dibagi dalam tiga bagian yaitu daerah stabil, metastabil, dan daerah labil. Daerah stabil adalah daerah larutan yang tidak mengalami kristalisasi. Daerah yang memungkinkan terjadinya kristalisasi tidak spontan adalah daerah metastabil, sedangkan daerah labil adalah daerah yang memungkinkan terjadinya kristalisasi secara spontan. Pada gambar diagram temperatur konsentrasi tersebut, jika suatu larutan yang terletak pada titik A didinginkan tanpa kehilangan volume pelarut (garis ABC), maka pembentukan inti secara spontan tidak akan terjadi sampai kondisi C tercapai. Larutan lewat jenuh dapat juga tercapai dengan mengurangi sejumlah volume pelarut dari pelarutnya dengan proses penguapan. Hal ini ditunjukkan dengan garis ADE, yaitu saat larutan di titik A diuapkan pada temperatur konstan (Wafiroh, 1995).

D. Pembentukan Kerak

Pembentukan kerak dan deposit endapan lain adalah proses kristalisasi yang kompleks. Kecepatan pembentukan lapisan awal kerak dan kecepatan pertumbuhan yang berikutnya ditentukan melalui interaksi dari beberapa kecepatan proses: nukleasi, difusi, reaksi kimia, dan kesesuaian pola geometris molekul-molekul dan atom-atom kristal kerak, dan lain-lain. Sebagian besar unsur pokok pembentukan kerak mineral, kelarutannya cenderung turun terhadap kenaikan suhu. Oleh karena itu, bila larutan lewat jenuh bersinggungan dengan permukaan transfer panas, mineral tersebut mengendap menjadi padatan karena daya larut setimbangnya menurun. Pada saat larutan menjadi lewat jenuh dan nukleasi terjadi, kondisi ini sangat cocok dan ideal untuk pertumbuhan kristal partikel kerak. Senyawa-senyawa yang dibawa air seperti kalsium karbonat dapat mengendap dan membentuk kerak sebagai akibat dari beda tekanan, perubahan temperatur, perubahan pH, dan lain-lain. Perubahan tersebut terjadi dalam peralatan proses, penukar panas, evaporator, boiler, dan cooling tower (Salimin dan Gunandjar, 2007).

Proses pembentukan kerak terjadi melalui 3 tahap, yaitu :

1. Pembentukan Inti

Pada tahap ini terjadi pembentukan inti kristal yang merupakan partikel sangat halus sehingga tidak akan mengendap pada saat proses aliran. Inti dapat dibentuk dari beberapa molekul atau ion komponen endapan yang tumbuh secara bersama-sama dan jaraknya berdekatan, dapat juga dikatakan partikel halus secara kimia tidak berhubungan dengan endapan, tetapi ada kemiripan dengan struktur kisi kristal. Jika inti dibentuk dari ion atau komponen endapan, fase awal endapan disebut nukleasi homogen.

2. Pertumbuhan Inti

Kristal terbentuk dari lapisan ion komponen endapan pada permukaan inti karena pada pengolahan air yang melibatkan proses pengendapan sering tidak mencapai kesetimbangan. Pada tahap pembentukan inti sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dari larutan, suhu, energi yang dipakai untuk berada pada tahap ini (misalnya agitasi) dan tambahan eksternal (memakai molekul kristal kembali seeding agent). Inti akan tumbuh menjadi butiran yang lebih besar dengan diameter $0,001 - 0,1 \mu$ (ukuran koloid), kemudian tumbuh lagi sampai diameter $0,1 - 10 \mu$ (kristal halus). Kristal akan mulai mengendap saat pertumbuhannya mencapai diameter lebih dari 10μ (kristal kasar).

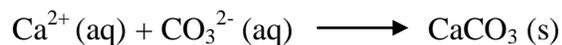
3. Pengendapan

Padatan yang awalnya terbentuk dengan pengendapan, kemungkinan bukan padatan yang paling stabil (secara termodinamika) untuk berbagai kondisi reaksi. Jika demikian selama jangka waktu tertentu struktur kristal endapan dapat berubah menjadi fasa stabil. Perubahan ini disertai penambahan endapan dan pengurangan konsentrasi larutan, sebab fasa yang stabil biasanya mempunyai kelarutan yang lebih

kecil dari fasa yang dibentuk sebelumnya. Pematangan juga terjadi pada ukuran kristal endapan yang bertambah sebab partikel yang lebih kecil memiliki energi permukaan yang besar dari pada partikel yang besar, konsentrasi larutan dalam kesetimbangan untuk partikel yang lebih tinggi sebanding untuk partikel yang lebih besar. Akibatnya, pada ukuran partikel yang beragam partikel yang lebih besar terus bertambah, sebab larutan masih dalam keadaan lewat jenuh. Partikel yang lebih kecil melarut, sebab konsentrasi larutan sekarang belum diketahui harga jenuhnya (Lestari *et al*, 2004).

E. Kalsium Karbonat (CaCO₃)

Kalsium karbonat (CaCO₃) dibuat dari reaksi CaCl₂ dengan Na₂CO₃ dalam air, atau melewati CO₂ melalui suspensi Ca(OH)₂ dalam air yang murni, menghasilkan CaCO₃ dan NaCl, kemudian dihasilkan dengan metode Richard dan Honischmidt dengan cara larutan Ca(NO₃) diasamkan sedikit dengan HNO₃. Lantas larutan tersebut ditambahkan dengan Ca(OH)₂ cair murni yang sedikit berlebih untuk mengendapkan sebagian besar Fe(OH)₃ dan Mg(OH)₂. Impuritas berupa garam-garam Ba, Sr, dan Mg dapat dihilangkan dengan cara merekristalisasi nitratnya berulang kali. Amonium karbonat yang dibutuhkan untuk mengendapkan karbonatnya bisa dimurnikan lewat destilasi dari air. Kalsium karbonat (CaCO₃) berupa endapan amorf putih terbentuk dari reaksi antara ion kalsium (Ca²⁺) dalam bentuk CaCl₂ dengan ion karbonat (CO₃²⁻) dalam bentuk Na₂CO₃ (Svehla, 1990).

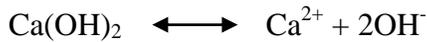
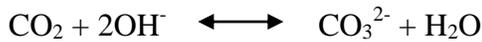


Kalsium karbonat (CaCO₃) merupakan suatu zat padat putih, tak berbau, tak berasa, terurai pada 825 °C, tak beracun, larut dalam asam dengan melepas CO₂, dan dijumpai di alam sebagai kalsit, napal, aragonit, travertin, marmer, batu gamping, dan kapur, juga ditemukan bersama mineral dolomit (CaMg(CO₃)₂). Benar-benar tidak larut dalam air (hanya beberapa bagian per juta), kristalnya berwujud rombik/rombohedral dan dimanfaatkan sebagai obat penawar asam, dalam pasta gigi,

cat putih, pembersih, bahan pengisi kertas, semen, kaca, plastik, dan sebagainya (Noviyanti *et al*, 2015).

Kelaurutan CaCO_3 yang sedikit dapat terbentuk jika larutan lewat jenuh dalam tempat pengolahannya terjadi kesetimbangan kimia dengan lingkungannya pada tekanan dan temperatur yang sebenarnya. Kesetimbangan CaCO_3 dapat diganggu dengan pengurangan gas CO_2 dari aliran selama proses produksi berlangsung (Suharso dan Buhani, 2015).

Pengendapan CaCO_3 dapat dihasilkan dari reaksi sebagai berikut (Zhang *et al*, 2002) :



Harga supersaturasi (δ_s) dari suatu larutan merupakan fungsi dari hasil kali kelaurutan (K_{sp}) dan konsentrasi ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dalam larutan dijelaskan dalam persamaan berikut ini :

$$\delta_s = \frac{(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})}{K_{sp}}$$

Harga K_{sp} CaCO_3 kalsit pada suhu 25°C adalah $8,7 \times 10^{-9}$, sedangkan konsentrasi (CO_3^{2-}) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$(\text{CO}_3^{2-}) = 5,6 \times 10^{-11} (\text{HCO}_3^-) / 10^{-\text{pH}} \text{ (Knez, 2005).}$$

Pembentukan inti (nuklei) CaCO_3 secara spontan dilarutan (homogenuos nucleation) membutuhkan harga supersaturasi $\delta_s = \delta_{kritis} = 40$ dan di permukaan (deposit) $\delta_s = \delta_{kritis} = 20$, dimana presipitasi baru mulai terjadi pada pH 8,5 untuk konsentrasi CaCO_3 sebesar 400 ppm (Fathi *et al*, 2006). Harga supersaturasi (δ_s) dari model

larutan CaCO_3 merupakan fungsi konsentrasi CaCO_3 terlarut dan pH larutan seperti yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai supersaturasi (δ_s) pada beberapa tingkat kesadahan dan pH pada suhu 25 °C (Fathi *et al*, 2006)

Kesadahan (ppm CaCO_3)	Supersaturasi (δ_s)			
	pH 5,7	pH 6,0	pH 7,0	pH 7,5
300	0,05	0,18	0,32	6,10
400	0,15	0,32	3,20	10,11
500	0,23	0,47	4,72	14,93

1. Pengaruh Terbentuknya Kerak (CaCO_3)

Kerak CaCO_3 yang sering dijumpai pada pipa peralatan industri dapat menimbulkan berbagai masalah seperti mengecilnya diameter pipa sehingga menghambat aliran fluida. Hal ini menyebabkan suhu semakin naik dan tekanan semakin tinggi sehingga kemungkinan pipa akan pecah (Asnawati, 2001). Pada operasi produksi minyak bumi, pembentukan kerak dapat mengurangi produktivitas sumur akibat tersumbatnya penorasi, pompa, *valve*, dan *fitting* (Halimatuddahlia, 2003). Oleh karena itu, perlu dilakukan metode pencegahan pembentukan kerak. Karena Adanya pembentukan kerak menimbulkan banyak kerugian, antara lain menyebabkan gangguan transfer panas dan korosi pada pipa aliran fluida, (Suharso dan Buhani, 2015). Oleh karena itu, perlu dilakukan pencegahan pembentukan kerak untuk mengurangi atau menghilangkan kerak kalsium karbonat yang terdapat pada peralatan-peralatan industri.

F. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak (CaCO_3)

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

1. Pengendalian pH

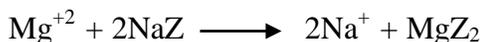
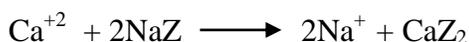
Pengendalian pH dengan penginjeksian asam (asam sulfat atau asam klorida) telah lama diterapkan untuk mencegah pengendapan oleh garam-garam kalsium, garam logam bivalen dan garam fosfat. Kelarutan bahan pembentukan kerak biasanya meningkat pada pH yang lebih rendah. Pada pH 6,5 atau kurang, korosi pada baja karbon, tembaga, dan paduan tembaga dengan cepat akan berlangsung dan pH efektif untuk mencegah pengendapan kerak hanyalah pada pH 7,0 sampai 7,5. Oleh karena itu, suatu sistem otomatis penginjeksian asam diperlukan untuk mengendalikan pH secara tepat. Namun, asam sulfat dan asam klorida mempunyai tingkat bahaya yang cukup tinggi dalam penanganannya (Lestari, 2000). Untuk mencegah terjadinya kerak pada air yang mengandung kesadahan tinggi (kira-kira 250 ppm CaCO_3) perlu adanya pelunakan dengan menggunakan kapur dan soda abu (pengolahan kapur dingin). Masalah kerak tidak akan dijumpai bilamana dipakai air bebas mineral karena seluruh garam-garam terlarut dapat dihilangkan. Suharso, pada jurnalnya membuktikan bahwa penambahan asam (*sodium dodecylbenzenesulfonic acid* (SDBS)) pada kristal boraks dapat menyebabkan perubahan morfologi dari kristal boraks yang sangat signifikan serta pada CaSO_4 dapat mengubah konduktivitasnya menjadi lebih besar dan memperkecil ukuran kristal CaSO_4 (Suharso *et al.*, 2007; Suharso dan Buhani, 2011). Oleh karena itu pemakaian air bebas mineral merupakan metoda yang tepat untuk menghambat kerak di dalam suatu sistem dengan pembebanan panas tinggi dimana pengolahan konvensional dengan bahan penghambat kerak tidak berhasil. Namun penggunaan air bebas mineral membutuhkan biaya yang cukup tinggi untuk digunakan dalam industri skala besar sehingga dapat menurunkan efisiensi kerja (Lestari *et al.*, 2004).

2. Pembebasan Mineral Air

Untuk mencegah terjadinya kerak pada air yang mengandung kesadahan tinggi (± 250 ppm CaCO_3) perlu adanya pelunakan dengan menggunakan kapur dan soda abu (pengolahan kapur dingin). Masalah kerak tidak akan dijumpai jika yang digunakan adalah air bebas mineral karena seluruh garam-garam terlarut dapat dihilangkan. Oleh karena itu, pemakaian air bebas mineral merupakan metode yang tepat untuk menghambat kerak di dalam suatu sistem dengan pembebanan panas tinggi dimana pengolahan konvensional dengan bahan penghambat kerak tidak berhasil (Lestari *et al.*, 2004). Namun, penggunaan air bebas mineral dalam industri-industri besar membutuhkan biaya yang cukup tinggi sehingga dapat menurunkan efisiensi kerja (Halimatuddahlia, 2003).

3. Pelunakan Zeolit

Pelunakan menggunakan zeolit dalam bentuk natrium dari resin dengan cara pertukaran ion. Natrium yang terkandung dalam resin ditukar dengan ion magnesium dan kalsium yang terkandung dalam air. Reaksi-reaksi ini ditunjukkan oleh persamaan kimia berikut. Naz merupakan resin natriumzeolit, Ca dan Mg adalah kalsium dan magnesium, masing-masing sebagai berikut:



Ketika semua ion natrium telah digantikan oleh kalsium dan magnesium, resin harus diregenerasi dengan larutan air garam (natrium klorida). Memang benar bahwa pelunakan menyerap banyak molekul organik yang berbeda, dan pelunakan meningkatkan muatan elektrostatik negatif padatan koloid. Namun, tidak ada bukti yang meyakinkan bahwa salah satu dari fungsi-fungsi ini secara signifikan

meningkatkan kinerja sistem. Bila dibandingkan dengan penambahan *antiscalant*, kelemahan utama dalam pelunakan zeolit adalah biaya yang mahal.

Selain dengan menggunakan ketiga cara yang dijelaskan di atas, pembentukan kerak juga dapat dicegah dengan menggunakan inhibitor kerak. Cara mencegah terbentuknya kerak dengan menggunakan inhibitor kerak adalah dengan menginjeksikan bahan-bahan kimia pencegah kerak (*scale inhibitor*) kedalam air formasi (Asnawati, 2001).

4. Penggunaan Inhibitor Kerak

Inhibitor kerak pada umumnya merupakan bahan kimia yang sengaja ditambahkan untuk mencegah atau menghentikan terbentuknya kerak bila ditambahkan dengan konsentrasi kecil kedalam air (Halimatuddahlia, 2003). Salah satu prinsip kerja dari inhibitor kerak yaitu pembentukan senyawa kompleks (khelat) antara inhibitor kerak dengan unsur-unsur pembentuk kerak. Senyawa kompleks yang terbentuk larut dalam air sehingga menutup kemungkinan pertumbuhan kristal yang besar dan mencegah kristal kerak untuk melekat pada permukaan pipa. bahan kimia yang ditambahkan untuk mencegah pembentukan kerak didukung dengan penggunaan bola-bola spons untuk membersihkan secara mekanis permukaan bagian dalam pipa (Patton, 1981).

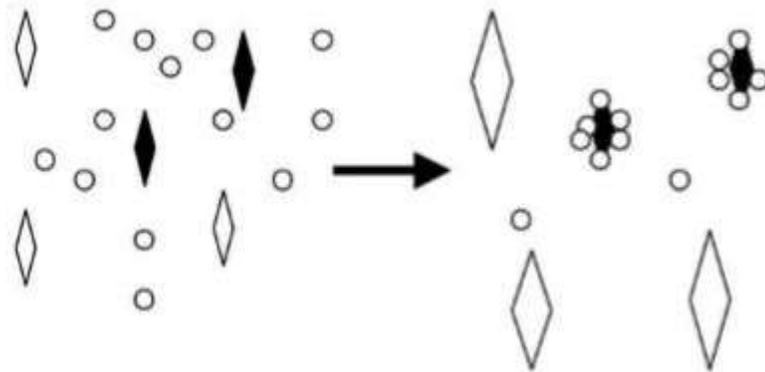
Syarat yang harus dimiliki senyawa kimia sebagai inhibitor kerak adalah sebagai berikut:

1. Inhibitor kerak harus menunjukkan kestabilan termal yang cukup dan efektif untuk mencegah terbentuknya air sadah dari pembentukan kerak
2. Inhibitor kerak juga harus dapat merusak struktur kristal dan padatan tersuspensi lain yang mungkin akan terbentuk

3. Selain itu, inhibitor kerak juga harus memiliki tingkat keamanan yang tinggi dalam penggunaannya sehingga tidak menimbulkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan sekitar (Al-Deffeeri, 2006).

Mekanisme kerja inhibitor kerak terbagi menjadi dua (Suharso, 2007), yaitu:

1. Inhibitor kerak dapat teradsorpsi pada permukaan kristal kerak pada saat mulai terbentuk. Inhibitor merupakan kristal yang besar yang dapat menutupi kristal yang kecil dan menghalangi pertumbuhan selanjutnya.
2. Bahan kimia dalam banyak hal dapat dengan mudah mencegah menempelnya suatu partikel-partikel pada permukaan padatan.



Gambar 5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan (\circ = inhibitor, \diamond = bibit kristal).

Gambar 5 memberikan gambaran bagaimana kerja Inhibitor dalam mengadsorpsi pada sisi-sisi pertumbuhan kristal dari bibit kristal (ditunjukkan pada kristal yang diberi warna hitam) yang mengakibatkan pertumbuhan kristal menjadi terhambat. Sedangkan pada bibit kristal yang tidak teradsorpsi oleh inhibitor (ditunjukkan pada kristal yang tidak diberi warna) mengalami pertumbuhan normal (Suharso *et al.*, 2009; Suharso *et al.*, 2014). Kemampuan penghambatan tergantung pada jumlah tempat adsorpsi, kerapatan muatan, ukuran molekul, berat molekul, dan modus interaksi dengan permukaan logam untuk membentuk kompleks permukaan logam

yang stabil (Wang *et al.*, 2001). Senyawa kimia ramah lingkungan sebagai inhibitor akan membentuk selaput adsorpsi pada permukaan logam dan mencegah timbulnya kerak pada permukaan logam. Adsorpsi bersifat subjektif terhadap kepadatan muatan permukaan logam dan juga muatan molekul inhibitor (Ma *et al.*, 2001).

Pada umumnya inhibitor kerak yang digunakan di ladang-ladang minyak atau pada peralatan industri dibagi menjadi dua macam yaitu inhibitor kerak anorganik dan inhibitor kerak organik. Senyawa anorganik fosfat yang umum digunakan sebagai inhibitor adalah kondensat fosfat dan dehidrat fosfat. Pada dasarnya bahan-bahan kimia ini mengandung grup P-O-P dan cenderung untuk melekat pada permukaan kristal. Sedangkan inhibitor kerak organik yang biasa digunakan adalah organo fosfonat, organo fosfat ester dan polimer-polimer organik. Inhibitor kerak yang pernah digunakan adalah polimer-polimer yang larut dalam air dan senyawa fosfonat (Asnawati, 2001).

G. Mekanisme Inhibitor Kerak

Metode penghambatan kerak yang paling umum dan efektif adalah dengan menggunakan inhibitor kerak. Penghambatan kerak berasal dari proses fisik yang lebih kompleks, seperti adsorpsi, nukleasi dan proses pertumbuhan kristal, daripada dengan reaksi kimia. Berikut ini adalah mekanisme pelarutan dan penghambatan kerak oleh inhibitor :

1. Penghambat Ambang Batas

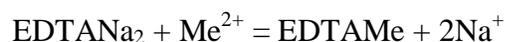
Penghambatan ambang batas didefinisikan sebagai kemampuan dari senyawa kimia pada tingkat sub stoikiometri untuk mempertahankan kelarutan ion mineral melebihi batas normalnya (Davis *et al.*, 1995; Stamatakis *et al.*, 2006). Istilah inhibisi (penghambatan) ambang batas menggambarkan mekanisme inhibitor kerak pada level sub mikroskopik kristal. Efek ambang batas ini dijelaskan dengan adsorpsi inhibitor

ke dalam kristal yang tumbuh dan mengubah morfologi kristal tersebut. Proses ini dapat mencegah pertumbuhan kristal atau setidaknya menunda untuk waktu yang lama. Fungsi sebenarnya dari mekanisme ini adalah untuk "melarutkan" kristal yang tumbuh tepat setelah nukleasi, dan mencegah kelanjutan dari mekanisme pergerakan. Sebuah inhibitor ambang batas pada dasarnya mengganggu atau menghilangkan mekanisme pertumbuhan kristal secara cepat dengan menyerap pada situs pertumbuhan kristal (Severtson *et al.*, 1999).

Adsorpsi mempengaruhi struktur kristal dan mendorong kristal secara termodinamis menuju pelarutan kembali daripada menuju pertumbuhan kristal secara spontan. Mekanisme ini umumnya berlaku untuk molekul yang berukuran kecil. Kebanyakan inhibitor adalah senyawa yang mengandung fosfor seperti polifosfat anorganik, ester fosfat organik, dan fosfat amino organik. Selain itu, beberapa amino polikarboksilat, fosfonopolikarboksilat, dan sulfonat juga dikenal sebagai inhibitor. Kehadiran gugus seperti -COOH, -OH, dan -NH₂ meningkatkan laju pelarutan dan efisiensinya (Demadis *et al.*, 2009).

2. Khelat

Ada dua atau lebih ikatan koordinasi dalam molekul agen pengkhelat atau agen pengompleks. Ikatan koordinasi sangat mudah membentuk senyawa kompleks dengan ion positif pada formulasi kristal dalam air. Air kehilangan ion positif dan pertumbuhan kerak menurun secara bersamaan. Sebagai contoh mekanisme penghambatan dari EDTA :



Dimana Me^{2+} mewakili ion positif Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , dan lain-lain. Rumus reaksi menunjukkan bahwa reaksi kimia antara agen pengkhelat dan ion positif kerak mengikuti "hukum komposisi konstan", yang berarti satu molekul EDTANa₂ hanya dapat bereaksi dengan satu ion positif kristal. Oleh karena itu, kuantitas jenis inhibitor

ini bergantung pada konsentrasi ion positif kristal dalam air, dosis inhibitor sering dalam jumlah yang sangat besar (Wang *et al.*, 2001).

Adsorpsi bersifat subjektif terhadap kepadatan muatan permukaan logam dan juga muatan molekul inhibitor. Mekanisme penghambatan kerak dapat dipengaruhi oleh jumlah tempat adsorpsi, kerapatan muatan, ukuran molekul, berat molekul dan modus interaksi dengan permukaan logam untuk membentuk kompleks permukaan logam yang stabil. Mekanisme pencegahan dan peleburan kerak oleh polimer hijau menunjukkan bahwa senyawa kimia atau polimer ramah lingkungan sebagai inhibitor membentuk selaput adsorpsi pada permukaan logam sehingga dapat mencegah timbulnya kerak pada permukaan logam (Ma *et al.*, 2001).

Agen pengompleks konvensional meskipun memiliki keuntungan yang jelas merupakan masalah besar karena tahan lama di lingkungan, remobilisasi ion logam beracun, dan implikasinya dalam eutropikasi sistem air alami. Oleh sebab itu, diperlukan penggantian dan penggunaan agen khelating dengan biodegradabilitas tinggi (Reinecke *et al.*, 2000).

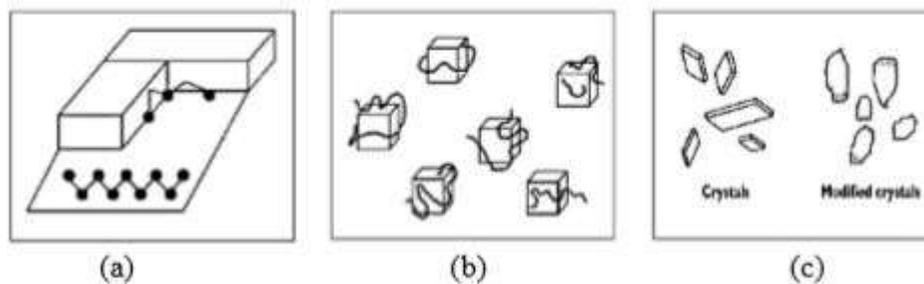
3. Distorsi Kristal

Mekanisme distorsi kristal adalah inhibitor dapat mengubah kristal kecil yang tumbuh dan membuat sel satuan dalam bentuk aksial yang berbeda. Akibatnya, pertumbuhan normal kristal terganggu, dan kerak tidak dapat terbentuk. Distorsi struktur kristal bisa meningkatkan stres internal kristal, yang menghasilkan pematangan kristal dan mencegah pengendapan mikrokristal (Yang *et al.*, 2001). Bahan kimia mempengaruhi susunan dan reaksi pertumbuhan kristal sehingga menyebabkan tidak biasa, bentuk yang tidak kristalin. Distorsi kristal juga menunda pertumbuhan kristal dari kristal yang biasanya sangat teratur. Molekul inhibitor menyerap ke situs pertumbuhan kristal yang aktif, menghasilkan penghalangan, dan pencegahan pertumbuhan lebih lanjut (Davis *et al.*, 1995).

Dalam kasus polimer, seperti *polyacrylates* dengan berat molekul rendah dan banyak polimer lainnya, polimer dapat mendistorsi struktur kisi kristal mineral pembentuk kerak dengan dosis yang rendah, meskipun pada tingkat yang jauh lebih rendah dari fosfonat. Hasilnya kristal lunak dan tidak menempel pada permukaan transfer panas. Poli (asam akrilat) dan poli (asam maleat) termasuk ke dalam produk yang paling umum digunakan pada mekanisme distorsi kristal (Severtson *et al.*, 1999).

4. Dispersi Kristal

Dispersi kristal adalah mekanisme aglomerasi dan pertumbuhan mikrokristal yang dicegah dengan peningkatan anionik pada permukaan. Peningkatan kekuatan ikatan elektrostatik antar mikrokristal mencegah pertumbuhan kisi kristal yang teratur. Modifikasi kristal terjadi ketika *antiscalant* terserap kemudian mengubah morfologi mikrokristal yang tumbuh, sehingga kristal berbentuk tidak teratur. Adanya kristal-kristal yang tidak teratur tersebut membuat lapisan kerak tidak dapat terbentuk pada permukaan sistem. Kristal yang kurang teratur lebih mudah terdispersi (menyebar). Kelompok fungsional yang berasal dari monomer seperti asam akrilik, asam metakrilat, asam maleat, asam poliakrilat, asam *polymethacrylic* dan sebagian poliakrilamida terhidrolisis adalah polimer yang paling umum digunakan untuk penyebaran kristal.



Gambar 6. Mekanisme Penghambatan Inhibitor (a) Threshold inhibition, (b) Crystal dispersion, (c) Crystal distortion (Severtson *et al.*, 1999).

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

H. Limbah Tempe

Limbah adalah buangan yang dihasilkan dari suatu proses industri maupun domestik (rumah tangga), yang lebih di kenal sebagai sampah, yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki lingkungan karena tidak memiliki nilai ekonomis. Limbah cair rebusan kedelai yang berasal dari proses pembuatan tempe apabila tidak dikelola dengan baik dan hanya langsung dibuang diperairan akan sangat mengganggu lingkungan disekitarnya. Limbah cair industri tempe tersebut memiliki kandungan kompleks terdiri dari protein sebesar 0,42%, lemak 0,113%, karbohidrat 0,11%, air 98,87%, kalsium 13,60 ppm, fospor 1,74 ppm, dan besi 4,55 ppm. Jika dimanfaatkan dengan tepat maka akan mengurangi pencemaran lingkungan dan menghilangkan sumber penyakit (Said, 1999). Menurut Said (1999) kandungan di dalam cair limbah cair tempe antara lain gas nitrogen (N_2), oksigen (O_2), hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), karbondioksida (CO_2), dan metana (CH_4). Hasil analisis kandungan hara limbah cair tempe dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Analisis kadar hara limbah cair tempe (Said, 1999)

Parameter	Kadar (%)
N Total	0,05
P tersedia	0,048
K	0,02

Kandungan air rebusan kedelai yaitu protein sebesar 5,29 %, lemak 0,54 %, air 72,08 % dan abu 3,38 %. Pada dasarnya, limbah tempe meliputi karakteristik fisika berupa warna, bau, padatan total dan juga suhu. Sedangkan secara kimia, karakteristik limbah tempe meliputi anorganik dan juga organik serta gas. Limbah ini jika dialirkan tanpa pengolahan terlebih dahulu, berpotensi menimbulkan kerusakan dan ketidakseimbangan biologis di alam (Riyanto, 2006). Pada dasarnya pengolahan limbah tempe sebelum dilepas ke alam mencakup antara lain penguraian secara anaerob dan proses pengolahan lanjut yang mencakup sistem biofilter anaerob-aerob (Sugiharto, 1994).

Dapat dilihat dari kandungan hara limbah cair tempe tersebut memiliki kandungan N total, P tersedia, dan K yang dapat dipertukarkan yang bervariasi. N total pada limbah cair tempe merupakan jumlah nitrogen total dalam limbah baik itu organik maupun anorganik. Protein ini akan diuraikan oleh mikroorganisme menjadi senyawa yang lebih sederhana yaitu nitrogen (N).

Kandungan P tersedia limbah cair buatan adalah 0,04%. Dalam air limbah fosfat terdapat dalam tiga bentuk persenyawaan yaitu P anorganik mudah larut, P organik terlarut dan P organik tersuspensi. Fosfor anorganik yang terlarut terdapat dalam bentuk ortofosfat. Kandungan kadar K dari limbah cair buatan ini adalah 0,02%. Hasil kandungan hara dalam limbah cair tempe sudah memenuhi kadar unsur hara yang sudah ditentukan Peraturan Menteri Pertanian No.28/Permentan/ OT.140/2/ 2009 yaitu < 2% (Notohadiprawiro, 1999).

1. Bakteri Asam Laktat

Bakteri asam laktat adalah kelompok bakteri yang menghasilkan asam laktat sebagai produk utama dari fermentasi karbohidrat atau gula. Nama bakteri asam laktat selalu diasosikan dengan bakteri yang mengasamkan susu, walaupun pada saat ini diketahui peranan bakteri asam laktat tidak hanya terbatas pada pengasaman susu, namun berperan juga pada proses fermentasi pangan lainnya seperti fermentasi sawi asin, kecap, tauco, keju, dan ikan. Kelompok bakteri asam laktat dikenal sebagai bakteri yang tahan asam. Sifat lain yang dimiliki oleh bakteri asam laktat adalah aerotoleran, di mana bakteri ini dapat mentoleransi keberadaan oksigen dalam lingkungannya, namun dia tidak membutuhkan oksigen untuk hidupnya. Untuk mendukung pertumbuhan bakteri asam laktat, perlu keberadaan nutrisi yang lengkap.

Bakteri Asam laktat (BAL) juga merupakan kelompok bakteri gram positif, katalase negatif yang dapat memproduksi asam laktat dengan cara memfermentasi karbohidrat, selnya berbentuk kokus, tersusun berpasangan atau berbentuk rantai, tidak bergerak, tidak berspora, anaerob fakultatif, bersifat non motil dan mesofil (Ray 2001).

Bakteri Asam Laktat (BAL) adalah kelompok bakteri Gram positif berbentuk kokus atau batang, tidak membentuk spora, suhu optimum pertumbuhan ± 40 °C, umumnya tidak bersifat motil merupakan bakteri anaerob, katalase negatif dan oksidase positif, menghasilkan asam laktat sebagai produk utama fermentasi dari karbohidrat. Sifat-sifat khusus bakteri asam laktat adalah mampu tumbuh pada kadar gula, alkohol, dan garam yang tinggi, mampu memfermentasikan monosakarida dan disakarida (Syahrurachman, 1994).

I. Metode *Seeded Experiment*

Umumnya terdapat dua metode yang digunakan untuk mengamati pertumbuhan kristal berdasarkan ada atau tidaknya kristal awalan atau bibit kristal, yaitu metode *seeded experiment* dan *unseeded experiment*. Metode *seeded experiment* merupakan salah satu metode pembentukan kristal dengan cara menambahkan bibit kristal ke dalam larutan pertumbuhan. Penambahan bibit kristal dilakukan untuk mendorong terjadinya proses kristalisasi dengan lebih cepat. Adanya area permukaan bibit kristal mempermudah pertumbuhan kristal menjadi lebih besar. Semakin cepat terjadinya proses kristalisasi, maka akan semakin cepat laju pertumbuhan inti kristal kalsium sulfat untuk membentuk kristal yang lebih besar. Hal ini dilakukan untuk melihat laju pertumbuhan kerak kalsium sulfat setelah ditambahkan inhibitor dengan penambahan bibit Kristal (Rahmania, 2012).

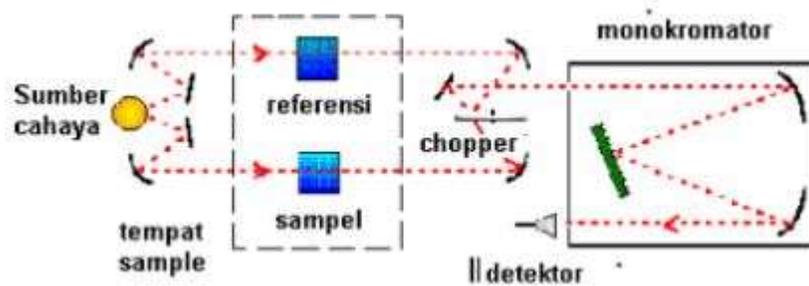
Pada penelitian ini dilakukan beberapa analisis terhadap kristal CaCO_3 yang terbentuk dan limbah tempe yang digunakan. Analisis tersebut meliputi analisis gugus fungsi dan komponen kimia terhadap limbah tempe dengan menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC), morfologi permukaan kristal CaCO_3 menggunakan SEM dan X-RD, serta analisis distribusi ukuran partikel menggunakan PSA. Analisis ini dilakukan agar dapat mengetahui seberapa efektif limbah tempe dalam menghambat pembentukan kerak CaCO_3 yang tumbuh pada metode *seeded experiment* ini.

J. Spektrofotometri Infra Merah (IR)

Spektrofotometri IR adalah metode yang digunakan dalam identifikasi struktur suatu senyawa yaitu dengan mengetahui adanya gugus-gugus fungsional utama dalam suatu sampel. Pada spektrofotometri IR, setiap gugus fungsi pada suatu senyawa akan menyerap radiasi infra merah pada panjang gelombang karakteristik. Sinar infra merah hanya dapat menyebabkan vibrasi atau getaran pada ikatan baik berupa

rentangan atau *stretching* maupun berupa bengkokan atau *bending* (Sitorus, 2009). Spektrofotometer IR juga didefinisikan spektrofotometer yang menggunakan sinar IR dekat, yakni sinar yang berada pada jangkauan panjang gelombang 2,5 –25 μm atau jangkauan frekuensi 400–4000 cm^{-1} . Sinar ini muncul akibat vibrasi atom-atom pada posisi kesetimbangan dalam molekul dan kombinasi vibrasi dengan rotasi menghasilkan spektrum vibrasi–rotasi (Khopkar, 2001).

Spektrum IR suatu molekul adalah hasil transisi antara tingkat energi vibrasi dan osilasi. Bila molekul menyerap radiasi IR, energi yang diserap akan menyebabkan kenaikan amplitude getaran atom-atom yang terikat sehingga molekul-molekul tersebut berada pada keadaan vibrasi tereksitasi (*excited vibrational state*); energi yang diserap ini akan dibuang dalam bentuk panas bila molekul itu kembali ke keadaan dasar. Dengan demikian spektrofotometer IR dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya gugus fungsi dalam suatu molekul.



Gambar 7. Skema Kerja *Spectrophotometer InfraRed* (IR) (Supratman, 2010).

K. High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

HPLC adalah singkatan dari High Performance Liquid Chromatography, yaitu alat yang berfungsi mendorong analit melalui sebuah kolom dari fasa diam (yaitu sebuah tube dengan partikel bulat kecil dengan permukaan kimia tertentu) dengan memompa cairan (fasa bergerak) pada tekanan tinggi melalui kolom. HPLC secara mendasar

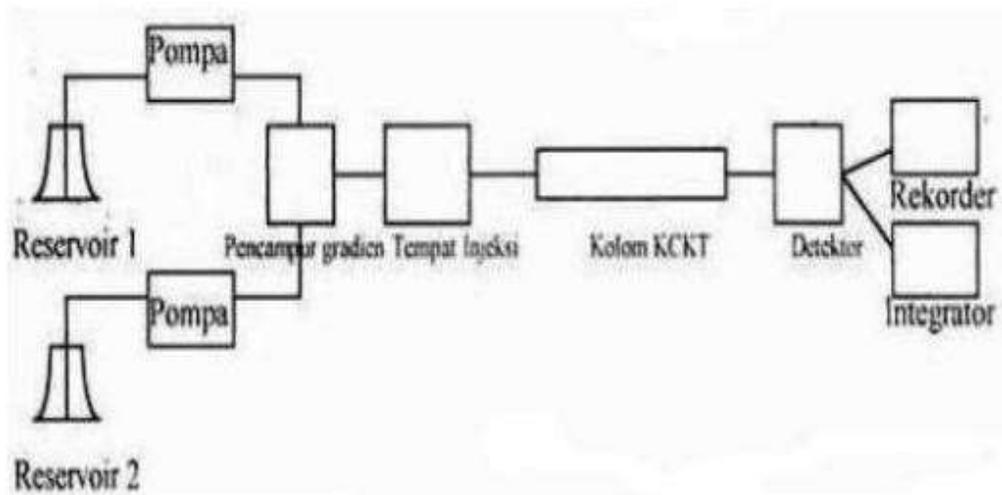
merupakan perkembangan tingkat tinggi dari kromatografi kolom. Selain dari pelarut yang menetes melalui kolom dibawah gravitasi, didukung melalui tekanan tinggi sampai dengan 400 atm. Prinsip kerja dari HPLC adalah dengan bantuan pompa fasa gerak cair dialirkan melalui kolom ke detektor. Kemudian cuplikan dimasukkan ke dalam aliran fasa gerak dengan cara penyuntikan. Didalam kolom terjadi pemisahan komponen-komponen campuran. Karena perbedaan kekuatan interaksi antara solute-solute terhadap fasa diam. Solute-solute yang kurang kuat interaksinya dengan fasa diam akan keluar dari kolom lebih dulu. Sebaliknya, solut-solut yang kuat berinteraksi dengan fasa diam maka solute-solut tersebut akan keluar kolom dideteksi oleh detektor kemudian direkam dalam bentuk kromatogram kromatografi gas. Seperti pada kromatografi gas, jumlah *peak* menyatakan konsentrasi komponen dalam campuran. Komputer dapat digunakan untuk mengontrol kerja sistem HPLC dan mengumpulkan serta mengolah data hasil pengukuran HPLC (Khopkar, 2003).

HPLC paling sering digunakan untuk menetapkan kadar senyawa-senyawa tertentu seperti asam-asam amino, asam-asam nukleat, dan protein-protein dalam cairan fisiologis; menentukan kadar senyawa-senyawa aktif obat, produk hasil samping proses sintesis, atau produk-produk degradasi dalam sediaan farmasi; memonitor sampel-sampel yang berasal dari lingkungan; memurnikan senyawa dalam suatu campuran; memisahkan polimer dan menentukan distribusi berat molekulnya dalam suatu campuran; kontrol kualitas; dan mengikuti jalannya reaksi sintesis (Gandjar dan Rohman, 2007).

HPLC biasanya menggunakan kolom dengan diameter yang kecil yaitu 2-8 mm dan memiliki ukuran penunjang partikel 50 μ m. Sedangkan laju aliran dipertinggi dengan tekanan yang tinggi. HPLC digunakan untuk isolasi zat-zat yang tidak dapat atau tidak mudah menguap dan untuk zat-zat yang secara thermal stabil. Luas puncak kromatografi dipengaruhi oleh perpindahan massa yaitu difusi Eddy, difusi longitudinal, dan transfer massa tidak seimbang. Efisiensi pemisahan akan semakin baik bila partikel penunjang berukuran kecil (Khopkar, 2003).

Menurut Adnan (1997), HPLC memiliki beberapa keunggulan yaitu:

1. HPLC dapat menangani senyawa-senyawa yang stabilitasnya terhadap suhu terbatas, begitu juga volatilitasnya bila tanpa menggunakan derivatisasi.
2. HPLC mampu memisahkan senyawa yang sangat serupa dengan resolusi yang baik.
3. Waktu pemisahan dengan HPLC biasanya singkat, sering hanya dalam waktu 5-10 menit, bahkan kadang-kadang kurang dari 5 menit untuk senyawa sederhana.
4. HPLC dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dengan baik dan dengan presisi yang tinggi, dengan koefisien variasi dapat kurang dari 1%.

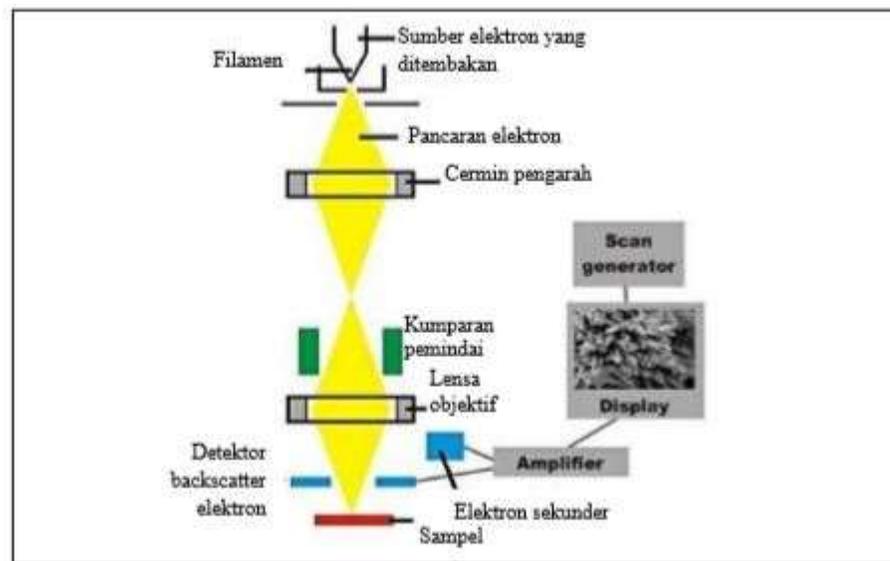


Gambar 8. Diagram blok HPLC (Putra, 2004).

L. Scanning Electron Microscopy (SEM)

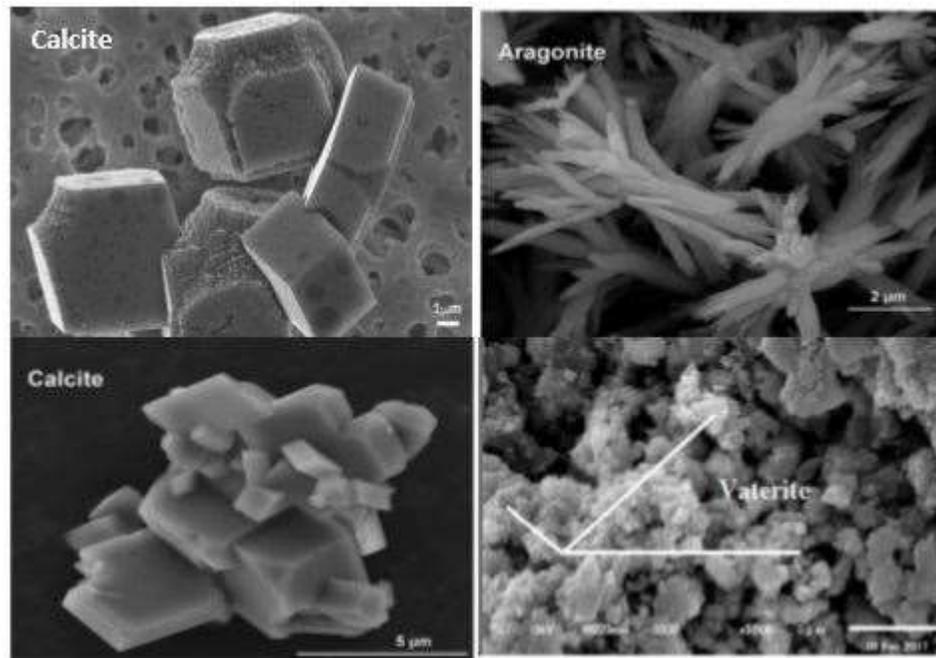
SEM adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang dapat mengamati dan menganalisis karakteristik struktur mikro dari bahan padat yang konduktif maupun yang nonkonduktif. Sistem pencahayaan pada SEM menggunakan radiasi elektron yang mempunyai $\lambda = 200 - 0,1 \text{ \AA}$, daya pisah (resolusi) yang tinggi sekitar 5 nm sehingga dapat dicapai perbesaran hingga ± 100.000 kali dan menghasilkan gambar atau citra yang tampak seperti tiga dimensi karena mempunyai *depth of field* yang tinggi. Sehingga SEM mampu menghasilkan gambar atau citra yang lebih baik

dibandingkan dengan hasil mikroskop optik. Pada prinsipnya mikroskop elektron dapat mengamati morfologi, struktur mikro, komposisi, dan distribusi unsur. Untuk menentukan komposisi unsur secara kualitatif dan kuantitatif perlu dirangkaikan satu perangkat alat EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometer*) atau WDS (*Wavelength Dispersive X-ray Spectrometer*) (Handayani *et al.*, 2004). Skema bagan SEM ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema bagan SEM (Smallman, 1991).

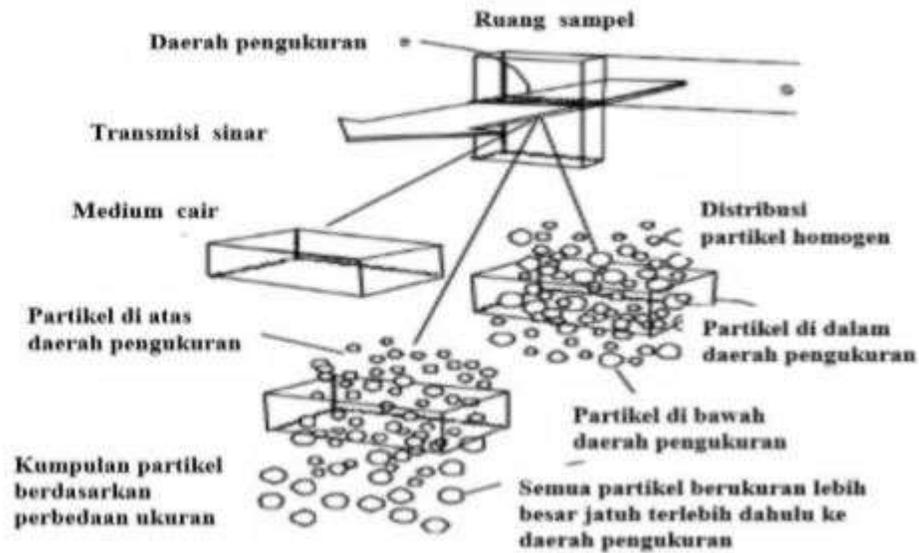
Analisis menggunakan SEM pada penelitian ini untuk mengetahui morfologi kerak CaCO_3 . Hasil analisis kerak CaCO_3 menggunakan SEM mengalami perubahan morfologi kerak, setelah penambahan inhibitor morfologi kerak CaCO_3 menjadi sedikit lebih kecil dan halus dibandingkan tanpa penambahan inhibitor ekstrak gambir yang termodifikasi (Suharso *et al.*, 2017a; Suharso *et al.*, 2019). Pada Gambar 10 ditunjukkan morfologi kerak CaCO_3 hasil analisis menggunakan SEM.



Gambar 10. Morfologi kerak CaCO_3 fase kalsit, aragonit, dan vaterit (Choi *et al.*, 2017).

M. *Particle Size Analyzer* (PSA)

Particle Size Analyzer (PSA) dapat menganalisis partikel suatu sampel yang bertujuan menentukan ukuran partikel dan distribusinya dari sampel yang representatif. Distribusi ukuran partikel dapat diketahui melalui gambar yang dihasilkan. Ukuran tersebut dinyatakan dalam jari-jari untuk partikel yang berbentuk bola. Penentuan ukuran dan distribusi partikel menggunakan PSA dapat dilakukan dengan (1) difraksi sinar laser untuk partikel dari ukuran submikron sampai dengan milimeter, (2) *control* principle untuk mengukur dan menghitung partikel yang berukuran mikron sampai dengan millimeter, (3) penghamburan sinar untuk mengukur partikel untuk yang berukuran mikron sampai dengan nanometer (Etzler, 2004). Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf dapat ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf (Webb, 2002).

Penyinaran sinar laser pada analisis ukuran partikel dalam keadaan tersebar. Pengukuran distribusi intensitas difraksi cahaya spasial dan penyebaran cahaya dari partikel. Distribusi ukuran partikel dihitung dari hasil pengukuran. Difraksi sinar laser analisis ukuran partikel meliputi perangkat laser untuk menghasilkan sinar laser ultraviolet sebagai sumber cahaya dan melekatkan atau melepaskan *flourescent* untuk mengetahui permukaan *photodiode array* yang menghitung distribusi intensitas cahaya spasial dan penyebaran cahaya selama terjadinya pengukuran. *Particle size analyzer* (PSA) mampu mengukur partikel distribusi ukuran emulsi, suspensi dan bubuk kering (Tottoki, 2007).

Keunggulan dari PSA antara lain:

1. Akurasi dan reproduksibilitas berada dalam $\pm 1\%$.
2. Dapat mengukur sampel dari 0,02 nm sampai 2000 nm.
3. Dapat mengukur distribusi ukuran partikel yang berupa emulsi, suspensi, dan bubuk kering (Hossaen, 2000).

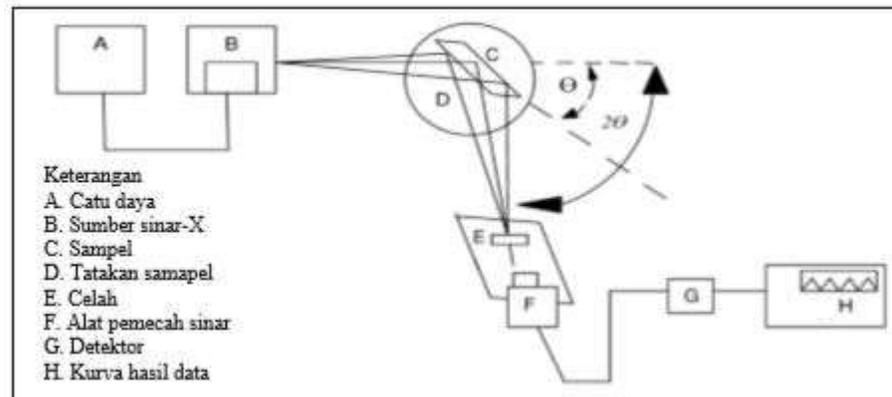
Analisis menggunakan PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel kerak CaCO_3 . Hasil analisis kerak CaCO_3 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor menggunakan PSA mengalami perubahan distribusi ukuran partikel. Kerak CaCO_3 tanpa inhibitor memiliki nilai tengah (*median*) sebesar 44,51 μm dan nilai rata-rata (*mean*) sebesar 133,70 μm . Setelah penambahan inhibitor 50 ppm ukuran partikel kerak CaCO_3 memiliki nilai tengah (*median*) sebesar 6,40 μm dan nilai rata-rata (*mean*) sebesar 8,26 μm . Jadi kerak CaCO_3 tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor memiliki selisih distribusi ukuran partikel berdasarkan nilai median sebesar 38,11 μm dan berdasarkan nilai mean sebesar 125,44 μm (Kurniawan, 2018). Hasil analisis menunjukkan bahwa dalam larutan pertumbuhan 0,1 M rata-rata distribusi ukuran partikel kerak CaCO_3 tanpa inhibitor sekitar 10,6 μm dan setelah ditambahkan inhibitor rata-rata distribusi ukuran partikelnya menjadi 5,01 μm (Suharso *et al.*, 2017).

N. X-Ray Diffraction (XRD)

Metode difraksi sinar-X adalah metode yang didasarkan pada difraksi radiasi elektromagnetik yang berupa sinar-X oleh suatu kristal. Sinar-X merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang yang pendek yaitu 0,5 – 2,5 Å. Sinar-X dihasilkan dengan cara menembakkan suatu berkas elektron berenergi tinggi ke suatu target dan menunjukkan gejala difraksi jika jatuh pada benda yang jarak antar bidangnya kira-kira sama dengan panjang gelombangnya pada suatu bidang dengan sudut θ (Cullity, 1987). Karakterisasi *X-Ray Diffraction (XRD)* ini merupakan teknik umum yang dipakai untuk mengetahui karakteristik kristalografi suatu material melalui puncak-puncak intensitas yang muncul. Bertujuan untuk mengidentifikasi struktur kristal, ukuran kristal serta fasa kristalin suatu sampel (Leofanti, 1997).

Analisis difraksi sinar-X didasarkan pada susunan sistematis atom-atom atau ion-ion di dalam bidang kristal yang dapat tersusun sedemikian rupa sehingga membentuk

kisi kristal dengan jarak antar bidang (d) yang khas. Setiap spesies mineral mempunyai susunan atom yang berbeda-beda sehingga membentuk bidang kristal yang dapat memantulkan sinar-X dalam pola difraksi yang karakteristik. Pola difraksi inilah yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi suatu senyawa (Rini, 2016). Skema kerja dari alat XRD ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Skema kerja alat XRD (Callister and David, 2009).

Setiap spesies mineral mempunyai susunan atom yang berbeda-beda sehingga membentuk bidang kristal yang dapat memantulkan sinar-X dalam pola difraksi yang karakteristik. Analisis difraksi sinar-X didasarkan pada susunan sistematis ion-ion atau atom-atom di dalam bidang kristal yang dapat tersusun sedemikian rupa sehingga membentuk kisi kristal dengan jarak antar bidang yang khas. Pola difraksi inilah yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi suatu senyawa. Pada penelitian ini, uji difraksi dilakukan untuk mempelajari struktur dan karakteristik dari kerak kalsium karbonat (CaCO_3).

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada bulan Maret 2021 sampai Juli 2021. Analisis menggunakan SEM dilakukan di UPT Laboratorium Teknologi dan Sentra Inovasi Terpadu (LTSIT) Universitas Lampung, Analisis menggunakan HPLC dan IR dilakukan di B2TP BPPT Lampung, analisis menggunakan PSA dilakukan di Laboratorium Sentral Universitas Padjajaran, dan analisis menggunakan XRD dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Sepuluh November.

B. Bahan dan Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat-alat gelas yang sering digunakan di laboratorium, *water bath* (THERMOSCIENTIFIC AC 200/S21) dari Amerika Serikat, gelas-gelas plastik, pengaduk magnet, spinbar, oven merek Innotech dari Cina, neraca analitik merek Arshwoth AA-160 dari Jepang, pH meter merek Metrohm 827 dari Swiss, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merek Zeiss evo MA 10 dari Kanada, *X-Ray Diffraction* (X-RD) merek Philip Analytical dari Belanda, *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) merek Shimadzu LC-10AD kolom Shim-pack SCR-101H dari Amerika Serikat, dan *Infra Red* (IR) merek Brucker Alpha II dari Amerika Serikat.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi CaCl_2 anhidrat, Na_2CO_3 , akuades, kertas saring, dan limbah cair tempe.

C. Prosedur Penelitian

1. Pembuatan Limbah Cair Tempe

Pada penelitian ini digunakan limbah cair tempe yaitu limbah cair tempe disentrifugasi dengan kecepatan 2500 rpm selama 30 menit. Kemudian diambil filtrat dari hasil sentrifugasi tersebut lalu dilakukan karakterisasi menggunakan Spektrofotometri Infra Merah (IR) dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC).

2. Pembuatan Inhibitor

Pada penelitian digunakan limbah cair tempe dengan variasi konsentrasi 5, 15, 25, 35, dan 45%. Pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 5% dilakukan dengan cara mengambil 50 mL limbah cair tempe, lalu diencerkan dengan akuades dalam labu ukur 1000 mL, kemudian dihomogenkan. Perlakuan yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 15, 25, 35, dan 45%.

3. Pembuatan Bibit Kristal

Bibit kristal dibuat dari CaCl_2 27,75 g yang dilarutkan dalam akuades dengan volume total 250 mL kemudian diaduk dengan menggunakan magnetik stirer pada suhu 90 °C selama 15 menit dan Na_2CO_3 26,5 g dilarutkan dalam akuades dengan volume total 250 mL kemudian diaduk dengan magnetik stirer pada suhu 90 °C selama 15 menit. Larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dicampurkan serta diaduk dengan magnetik stirer pada suhu 90 °C hingga mengendap sempurna. Kemudian endapan dipisahkan dengan

kertas saring dan endapan dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3-4 jam. Prosedur ini diulang beberapa kali sampai diperoleh jumlah bibit kristal sebanyak 50 gram dan cukup untuk melakukan prosedur berikutnya.

4. Optimasi Waktu Simpan Inhibitor

Pada penelitian ini digunakan variasi waktu simpan limbah cair tempe untuk mengetahui keefektifannya sebagai inhibitor pada kondisi optimum. Tahapan yang digunakan pada prosedur ini yaitu dengan menyiapkan limbah cair tempe pada waktu simpan 1 hari, 3 hari, dan 7 hari, kemudian masing-masing limbah cair tempe di sentrifus dengan kecepatan 2500 rpm selama 30 menit dan diukur pH nya menggunakan pH meter. Limbah cair tempe yang sudah di sentrifus digunakan sebagai inhibitor 25% pada larutan pertumbuhan 0,05 M CaCO_3 , selanjutnya dibandingkan perubahan rendemen kerak dengan larutan pertumbuhan 0,05 M CaCO_3 tanpa inhibitor untuk dapat mengetahui keefektifan limbah cair tempe pada kondisi optimum.

5. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaCO_3

Tahapan untuk menguji pengujian limbah cair tempe sebagai inhibitor dalam pengendapan kristal CaCO_3 dengan metode *seeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

a. Penentuan Laju Pertumbuhan CaCO_3 Tanpa Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dari konsentrasi larutan CaCl_2 0,1 M (1,665 gram)

dan larutan Na_2CO_3 0,1 M (1,59 gram) masing-masing dalam 150 mL akuades. Setiap larutan diaduk hingga homogen selama ± 15 menit dengan suhu 60°C . Selanjutnya, larutan CaCl_2 0,1 M dan larutan Na_2CO_3 0,1 M dicampurkan dan diaduk selama ± 15 menit dengan suhu 60°C agar terbentuk kerak CaCO_3 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter. Kemudian campuran dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik sebanyak masing-masing 50 mL dan ditambahkan 0,2 g bibit kristal. Setelah itu, diletakkan dalam waterbath pada suhu 90°C selama 50 menit (10 menit pertama satu gelas diambil, selanjutnya diambil setiap 10 menit). Kemudian dilakukan penyaringan dengan menggunakan kertas saring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 3-4 jam. Selanjutnya, endapan ditimbang untuk mengetahui berat kristal yang terbentuk. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 sebesar 0,15 M (2,4975 gram CaCl_2 + 2,385 gram Na_2CO_3); 0,2 M (3,33 gram CaCl_2 + 3,18 gram Na_2CO_3).

b. Penentuan Laju Pertumbuhan CaCO_3 dengan Penambahan Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dengan cara melarutkan CaCl_2 0,1 M (1,665 gram) dan larutan Na_2CO_3 0,1 M (1,59 gram) masing-masing dalam larutan asap cair tempurung kelapa grade 5% hingga mencapai volume 150 mL. Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 15 menit dengan suhu 60°C untuk menghomogenkan larutan. Selanjutnya, kedua larutan tersebut dicampur ± 15 menit dengan suhu 60°C agar terbentuk kerak CaCO_3 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter. Kemudian dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik masing-masing 50 mL dan ditambahkan 0,2 g bibit kristal dan diletakkan dalam waterbath pada suhu 90°C selama 50 menit (10 menit pertama satu gelas diambil, selanjutnya gelas diambil setiap 10 menit). Larutan dalam gelas tersebut disaring menggunakan kertas saring dan dikeringkan kerak yang didapat menggunakan oven pada suhu 105°C selama 3-4 jam. Selanjutnya, endapan

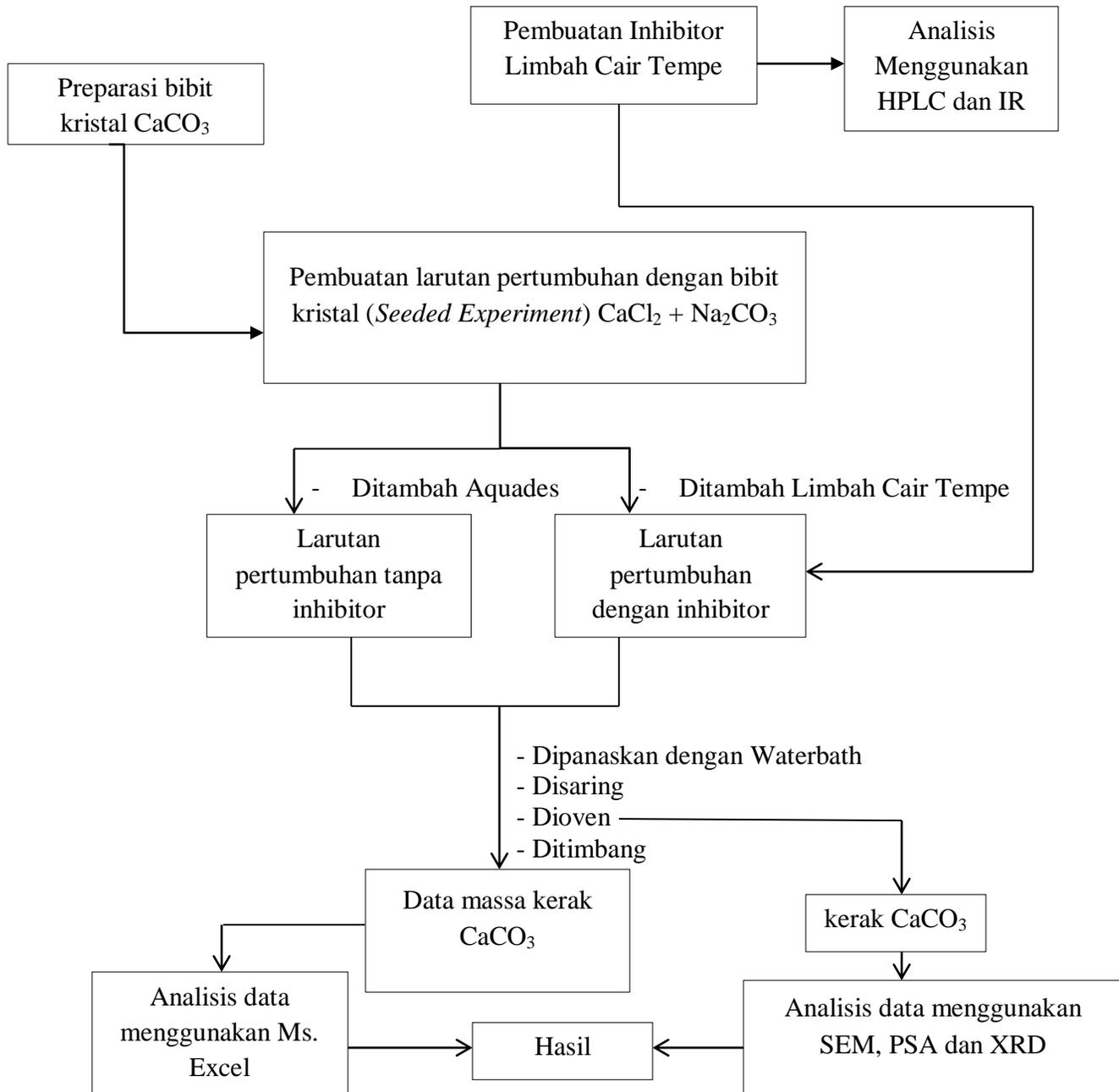
ditimbang untuk mengetahui berat kristal yang terbentuk. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 sebesar 0,15 M (2,4975 gram CaCl_2 + 2,385 gram Na_2CO_3); 0,2 M (3,33 gram CaCl_2 + 3,18 gram Na_2CO_3) serta pada variasi konsentrasi inhibitor 15, 25, 35 dan 45% menggunakan limbah cair tempe.

6. Analisa Data

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

D. Diagram Alir

Secara keseluruhan penelitian ini terangkum dalam diagram alir penelitian yang ditunjukkan dalam Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada penelitian, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Inhibitor limbah cair tempe dapat menghambat pembentukan kristal kerak kalsium karbonat (CaCO_3).
2. Kemampuan inhibitor limbah cair tempe dalam menghambat pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) yang paling efektif pada larutan pertumbuhan dengan konsentrasi 0,05 M dan pada konsentrasi inhibitor 45% dengan nilai persentase efektivitas sebesar 73,88%.
3. Analisis morfologi kerak CaCO_3 menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan perubahan morfologi kristal tanpa penambahan dan dengan penambahan inhibitor. Tanpa penambahan inhibitor kristal CaCO_3 terbentuk fase kalsit dan fase aragonit, sedangkan dengan penambahan inhibitor kristal CaCO_3 terbentuk fase kalsit, fase vaterit, dan fase aragonit.
4. Analisis struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan perbedaan puncak difraktogram 2θ . Tanpa penambahan inhibitor menunjukkan fase kalsit dan fase aragonit, sedangkan dengan penambahan inhibitor menunjukkan fase kalsit, fase vaterit, dan fase aragonit.

5. Analisis distribusi partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa tanpa penambahan inhibitor memiliki nilai mean sebesar 364,4 μm , sedangkan dengan penambahan inhibitor memiliki nilai mean sebesar 8,009 μm .

B. Saran

Untuk meningkatkan mutu penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan saran yaitu perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terhadap penghambatan kristal CaCO_3 dengan menambah variasi konsentrasi larutan pertumbuhan yang lebih rendah dengan metode sama, serta perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terhadap penghambatan jenis kerak lainnya. Selain itu, perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut tentang limbah cair tempe sebagai inhibitor agar dapat tahan lama tanpa berkurangnya efektivitas inhibitor tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, M. 1997. *Teknik Kromatografi Untuk Analisis Bahan Makanan*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Aisah, S. 2016. Efek Penambahan Ekstrak Gambir (*Uncaria Gambier Roxb*), Kemenyan Putih (*Styrax Benzoin Dryand*), dan Aditif Golongan Karboksilat sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Skripsi. Jurusan Kimia FMIPA*. Universitas Lampung. Lampung. Hlm 94.
- Amjad, Z. 1987. Kinetics of crystal growth of calcium sulfate dihydrate, The influence of polymer composition, molecular weight, dan solution pH. *Canadian Journal of Chemistry*. 66(6): 1529-1536.
- Asnawati. 2001. Pengaruh Temperatur Terhadap Reaksi Fosfonat dalam Inhibitor Kerak pada Sumur Minyak. *Jurnal Ilmu Dasar*. 2 (1): 20-26.
- Al-Deffeeri, N.S. 2006. Heat Transfer Measurement as Acrriterion for Performance Evaluation of Scale Inhibition in MSF Plantsin Kuwait. *Desalination*. 204:423-436.
- Badr, A. and Yassin, A.A.M. 2007. Barium Sulfate Scale Formation in Oil Reservoir During Water Injection at High-Barium Formation Water. *Journal of Applied Sciences*. 7 (17): 2393-2403.
- Bakhtiar, A. 1991. Manfaat Tanaman Gambir. Makalah pada Penataran Petani dan Pedagang Pengumpul Gambir di Kabupaten 50 Kota (Sumatra Barat) 29-30 November 1991. *Royal Society of Chemistry*. Cambridge. Pp 45-59.
- Bhatia, A. 2003. *Cooling Water Problems and Solutions*. Continuing Education and Development, Inc. 9 Greyridge Farm Court Stony Point, NY 10980. Course no: M05-009.
- Brown, G.G. 1978. *Unit Operation*. John Wiley and Sons Inc., Wiley Eastern Limited, Charles E. Tuttle co. New York.

- Callister, W.D and David, R.G. 2009. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8th Edition. John Wiley & Sons Inc. New York. Hlm 74.
- Chauhan, K., Sharma, P., and Chauhan, G.S. 2015. Removal/Dissolution of Mineral Scale Deposits. *Mineral Scale and Deposits*. Pp 701-720.
- Choi, H., Inoue, M., and Sengoku, R. 2017. Control of The Polymorphism of Calcium Carbonate Produced by Self-Healing in The Cracked Part of Cementitious Materials. *Applied Sciences*. 546 (7): 1-16.
- Cowan, J.C. and Weintritt, D.J. 1976. *Water Formed Scale Deposit*. Houston, Texas. Gulf Publishing Co. Pp 481-484.
- Cullity, B.D. 1987. *Element of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. New York. Pp 493-496.
- Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Johnson, A., and King, G. 1999. Fighting Scala Removal and Prevention. *Oilfield Review*. 11 (3): 30-45.
- Davis, R.V., Carter, P.W., Kamrath, M.A., Johnson, D.A., and Reed, P.E. 1995. The Use of Modern Methods in The Development of Calcium Carbonate Inhibitors for Cooling Water Systems. *Mineral Scale Formation and Inhibition*. Pp 33-46.
- Demadis, K.D., Anagnostou, Z., and Zhao, H. 2009. Novel Calcium Carboxyphosphonate/Polycarboxylate Inorganic-Organic Hybrid Materials from Demineralization of Calcitic Biomineral Surfaces. *ACS Applied Materials Interfaces*. 1: 35-38.
- Dwi, N. dan Handayani, S. 2012. Pengaruh Alur Pemanasan Terhadap Karakter Bahan Semikonduktor Pb(se_{0,6} te_{0,4}) Hasil Preparasi dengan Teknik Bridgman. (Thesis). Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta. Hlm 81.
- Etzler, F.M. 2004. *Particle Size Analysis: A Comparison of Methods*. American Pharmaceutical Review. American.
- Fathi, A., Tlili, M., Gabrielli, C., George, M., and Ben, M. A. 2006. Effect of A Magnetic Water Treatment on Homogenous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate. *Water Research*. 40: 1941-1950.
- Halimatuddahlia. 2003. Pencegahan Korosi dan Scale pada Proses Produksi Minyak Bumi. *Laporan Penelitian*. FMIPA-USU. Medan. Hlm 1-8.

- Handayani, D., Ranova, R., Bobbi, H., Farlian, A., Almahdi, dan Arneti. 2004. Pengujian Efek Anti Feedan dari Ekstrak dan Fraksi Daun Gambir (*Uncaria gambir* Roxb) terhadap Hama Spedoptera litura Fab. (Lepidoptera; Noctuide). *Seminar Nasional Tumbuhan Tanaman Obat Indonesia XXVI*. Padang.
- Holysz, L., Szczes, A., and Chibowski, E. 2007. Effect of Carboxylic Acids on Water and Electrolyte Solution. *Journal of Colloid and Interface Science*. 316: 65-1002.
- Hasson, D. and Raphael, S. 2005. Scale Control in Saline and Wastewater. Desalination. *Israel Journal of Chemistry*. 46: 97-104.
- Hossaeen, A. 2000. *Particle Size Analyzer*. King Fahd Petroleum & Mineral. Arab Saudi. Hlm 83.
- Jones, F., Oliveira., Rohl A., Ogden., M., and Parkinson, G. 2006. Understanding The Mechanism By Which Nitriolotriacetic Acid Interacts with Precipitating Barium Sulfate. *Crystal Engineering Communication*. 8: 869-876.
- Gandjar, I. G. dan Rohman, A. 2007. *Kimia Farmasi Analisis*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Kazakevich, Y. dan Brutto, L. 2007. *HPLC for Pharmaceutical Scientist*. New York. John Wiley and Sons. Inc.
- Kemmer, F. N. 1979. *The Nalco Water Hand Book*. Nalco Chemical Co. McGraw Hill Book CO. New York. 20: 1-19.
- Khopkar, S.M. 2001. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta. Hlm 194-196.
- Khopkar, S. M. 2003. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta.
- Knez, S., and Pohar, C. 2005. The Magnetic Field Influence on the Polymorph Composition of CaCO_3 Precipitated from Carbonized Aqueous Solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 281: 377-388.
- Kurniawan, Y.H. 2018. Studi Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa Grade 2 Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3) Menggunakan Metode *Unseeded Experiment*. (Skripsi). Jurusan Kimia FMIPA. Universitas Lampung. Lampung. Hlm 64-74.
- Leofanti, G. 1997. Catalyst Characterization: Applications. *Catalysis Today*. 34: 329-352.

- Lestari, D. E. 2000. Penelusuran Unsur Pembentuk Kerak pada Sistem Pendingin Sekunder Reaktor GA Siwabessy dengan Metoda Analisis Aktivasi Neutron (AAN). *Prosiding Hasil Penelitian P2TRR*. Hlm 115-121.
- Lestari, D.E., Sunaryo, G.R., Yulianto, Y.E., Alibasyah, S., dan Utomo, S.B. 2004. Kimia Air Reaktor Riset G.A. Siwabessy. *Makalah Penelitian P2TRR dan P2TKN BATAN*. Serpong. Hlm 15-21.
- Lestari, D.E. 2008. *Kimia Air: Pelatihan Operator dan Supervisor Reaktor Riset*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Serpong.
- Ma, H., Chen, S., Zhao, S., Liu, X., and Li, D. 2001. A Study of Corrosion Behavior of Copper in Acidic Solutions Containing Cetyltrimethylammonium Bromide. *Journal Electrochemical Society*. 148: 482-488.
- Mansyur, T., Dhalika, I., Hernaman, A., Budiman, R.Z., Islami, dan Wiyatna. 2015. Produksi Asam Laktat dalam Fermentasi Anaerob Limbah Air Kedelai dari Industri Tempe. *Prosiding Hasil Penelitian*. (2):524-525.
- Muryanto, S., Bayuseno, A.P., Ma'mun, and Usamah, M. 2014. Calcium Carbonate Scale Formation in Pipes: Effect of Flow Rates, Temperature, and Malic Acid as Additives. *Procedia Chemistry*, 9: 69-76.
- Notohadiprawiro, T. 1999. *Tanah Dan Lingkungan*. Jakarta: Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Noviyanti, N., Jasruddin, J., dan Sujiono, E. H. 2015. Karakterisasi kalsium karbonat (CaCO_3) dari batu kapur Kelurahan Tellu Limpoe Kecamatan Suppa. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika. Universitas Negeri Makasar*. Makasar. Hlm 169-172.
- Nunn, R.G. 1997. *Water Treatment Essentials far Boiler Plant Operation*. McGraw Hill. New York. Capillary Zone Electrophoresis. Elsevier B.V. *Journal of A Chromatography*, 934. Pp 113-122.
- Patton, C. 1981. *Oilfield Water System. 2 ed. Cambeel Petroleum Series*. Oklahoma. Pp 49-79.
- Putra, E. D. L. 2004. *Kromatografi Cair Kinerja Tinggi Dalam Bidang Farmasi*. Medan: Jurusan Farmasi Fakultas Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara.

- Rahmania, Y. 2012. Studi Pendahuluan Ekstrak Kulit Kakao (*Theobroma Cacao L.*) Dan Nalco 72990 Sebagai Inhibitor Pembentuk Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). (Skripsi). Jurusan Kimia FMIPA Unila. Lampung.
- Rahmalinda, Amri, dan Zutiniar. 2014. Studi Komparasi Karakteristik Asap Cair Hasil Pirolisis dari Kulit Durian, Pelepah dan Tandan Kosong Sawit dengan Pemurnian Secara Distilasi. *Jurnal Online Mahasiswa Bidang Teknik dan Sains Universitas Riau*. Riau. 1(1).
- Ray, B. 2001. *Undamental Food Microbiology 2nd Ed.* Boca Raton: CRC Press.
- Reinecke, F., Groth, T., Heise, K.P., Joentgen, W., Müller, N., and Steinbüchel, A. 2000. Isolation and Characterization of an Achromobacter Xylooxidans Strain B3 and Other Bacteria Capable to Degrade The Synthetic Chelating Agent Iminodisuccinate. *FEMS Microbiology Letters*. 188: 41-46.
- Rini, H. U. 2016. Pengaruh Penggunaan Campuran Ekstrak Gambir dan Kemenyan sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4). (Thesis). Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Lampung. Hlm 68.
- Riyanto, H. 2006. *Pemanfaatan Limbah Air Rebusan Kedelai Untuk Pembuatan Nata de Soya (Kajian Penambahan Sukrosa Dan Ekstrak Kecambah)*. Malang: University of Muhammadiyah Malang.
- Said, I. M. 1999. *Teknologi Pengolahan Air Limbah Tahu-Tempe Dengan Proses Biofilter Anaerob Dan Aerob*. Jakarta: Direktorat Teknologi Lingkungan.
- Salimin, Z. dan Gunandjar. 2007. *Penggunaan EDTA sebagai Pencegah Timbulnya Kerak pada Evaporasi Limbah Radioaktif Cair*. Prosiding PPIPDIPN. Pustek Akselerator dan Proses Bahan-BATAN. Yogyakarta. Hlm 1-8.
- Severtson, S.J., Prasad, Y.D., Philip, W.C. and Peter, E.R. 1999. Mechanism and Chemical Control of CaCO_3 Scaling in The Kraft Process. *Tappi Journal*. 832 (6): 167-174.
- Sitorus, M. 2009. *Spektroskopi (Elusidasi Struktur Molekul Organik)*. Graha Ilmu. Yogyakarta. Hlm 78.
- Smallman, R.E. 1991. *Metalurgi Fisik Modern. Edisi Keempat*. Diterjemahkan Oleh Djaprie, S., Arifin, B., dan Myrna, A. PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hlm 55.

- Smallman, R.E. dan Bishop, R.J. 2000. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Edisi Keenam. Diterjemahkan Oleh Djaprie, S. Erlangga. Jakarta. Hlm 473.
- Stamatakis, C., Chatzichristos, E., Sagen, J., Stubos, A., Palyvos, I., Muller, J., and Stokkan, J.A. 2006. An Integrated Radiotracer Approach for the Laboratory Evaluation of Scale Inhibitors Performance in Geological Environments. *Chemical Engineering Science*. 61: 7057-7067.
- Sugiharto. 1994. *Dasar – Dasar Pengelolaan Air Limbah*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Suharso. 2007. Effect of Sodium Dodecylbenzenesulfonic Acid (SDBS) on the Growth Rate and Morphology of Borax Crystal. *Indonesian Journal of Chemistry*. 7 (1): 5-9.
- Suharso, Buhani, Suhartati, T., dan Aprilia, L. 2007. Sintesis C- Metil-4,10,16,22 Tetrametoksi Kaliks[4]Arenas dan Peranannya sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). Laporan Akhir Program Insentif. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suharso, Buhani, and Suhartati, T. 2009. The Role of C-Methyl-4,10,16,22 Tetrametoxo Calix[4] Arene as Inhibitor of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Indonesian Journal of Chemistry*. 9 (2): 206 – 210.
- Suharso, Buhani, Bahri, S., and Endaryanto, T. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as a Green Inhibitor of Calcium Sulphate (CaSO_4) Scale Formation. *Asian Journal Research Chemistry*. 3(1): 183-187.
- Suharso dan Buhani. 2011. Efek Penambahan Aditif Golongan Karboksilat dalam Menghambat Laju Pembentukan Endapan Kalsium Sulfat. *Jurnal Natur Indonesia*. 13 (2):100-104.
- Suharso, Buhani, and Aprilia, L. 2014. Influence of Calix[4] Arene Derived Compound on Calcium Sulphate Scale Formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26(18): 6155–6158.
- Suharso dan Buhani. 2015. *Penanggulangan Kerak Edisi 2*. Graha Ilmu. Yogyakarta. Hlm 92.
- Suharso, Buhani, Yuwono, S.D., and Tugiyono. 2017. Inhibition of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation by Calix[4] Resorcinarene Compounds. *Desalination and Water Treatment*. 68: 32-39.

- Suharso, Reno, T., Endaryanto, T., and Buhani. 2017a. Modification of Gambier Extracts as Green Inhibitor of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Journal of Water Process Engineering*. 18: 1-6.
- Suharso, Buhani, Utari, H.R., Tugiyono and Satria, H. 2019. Influence of Gambier Extract Modification as Inhibitor of Calcium Sulfate (CaSO_4) Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 22-28.
- Suharso, Setiososari, E., Kiswandono, A.A., Buhani and Satria, H. 2019a. Liquid Smoke of Coconut Shell as Green Inhibitor of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 29-37.
- Supratman, U. 2010. *Equilibrium Penentuan Senyawa Organik*. Universitas Padjajaran. Bandung. Hlm 102-108.
- Svehla, G. 1990. *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*. Alih Bahasa Oleh L. Setiono dan A. H Pudjaatmaka. PT. Kalman Media Pustaka. Jakarta.
- Syahri, M., dan Sugiharto, B. 2008. Scale Treatment pada Pipa Distribusi Crude Oil Secara Kimiawi. *Prosiding Seminar Nasional Teknoin*. Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri UPN, Yogyakarta. Indonesia. Hlm 5.
- Syahrurachman, A. 1994. *Mikrobiologi Kedokteran Edisi Revisi*. Jakarta: Bima Rupa Aksara
- Tottoki, S., Wada, Y.N. M., and Shimaoka, H. 2007. DEP Active Grating Method: A New Approach for Size Analysis of Nano-Sized Particles. *Shimadzu Review*. 62: 173-179.
- Wafiroh, S. 1995. Pemurnian Garam Rakyat dengan Kristalisasi Bertingkat. Laporan Penelitian. Universitas Airlangga. Surabaya.
- Wang, L., Yin, G.J., and Yin, J.G. 2001. 2-Mercaptothiazoline and Cetylpyridinium Chloride as Inhibitors for The Corrosion of a Low Carbon Steel in Phosphoric Acid. *Corrosion*. 43: 1197-1202.
- Webb, P.A. 2002. *Interpretation of Particle Size Reported by Different Analytical Technique*. Diakses melalui www.micromeritics.com. Pada 9 Desember 2020
- Yang, Q., Liu, Y., Gu, A., Ding, J., and Shen, Z. 2001. Investigation of Calcium Carbonate Scaling Inhibition and Scale Morphology by AFM. *Journal of Colloid Interface Science*. 240 (2): 608–621.

Zeihner, E. H. K., H. Bosco, and K. D. Williams. 2003. Novel Antiscalant Dosing Control. Elsevier Science B.V. *Desalination*. 157: 209-216.

Zhang, K., M. Sun, P. Werner, A. J. Kovera, J. Albu, F. X. Pi-Sunyer, and C. N. Boozer. 2002. Sleeping Metabolic Rate in Relation to Body Mass Index and Body Composition. *International Journal of Obesity Relations Metabolic Disorder*. 26: 376-383.