

**STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR
KALSIUM SULFAT (CaSO_4) MENGGUNAKAN METODE *SEDED*
*EXPERIMENT***

(Skripsi)

Oleh

NURUL ROSADINAH



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

ABSTRAK

STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR KALSIUM SULFAT (CaSO_4) MENGGUNAKAN METODE *SEEDED EXPERIMENT*

Oleh

Nurul Rosadinah

Pada industri minyak dan gas sering dijumpai permasalahan pada pipa seperti terjadinya pengendapan garam yang disebut dengan kerak. Salah satu kerak yang terbentuk pada pipa-pipa industri adalah kalsium sulfat (CaSO_4). Kerak pada pipa-pipa industri akan mengakibatkan aliran fluida terhambat baik dalam pipa maupun alat penukar panas. Untuk mengatasi hal tersebut, pada penelitian ini digunakan limbah cair tempe sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4) dengan metode penambahan bibit kristal (*seeded experiment*) pada suhu $90\text{ }^\circ\text{C}$ dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1; 0,15; dan 0,2 M serta variasi inhibitor 5, 15, 25, 35, dan 45%. Untuk melihat waktu simpan inhibitor, inhibitor disimpan selama 1, 3, dan 7 hari. Limbah cair tempe dengan waktu simpan 1 hari digunakan sebagai inhibitor. Nilai persen efektivitas paling efektif diperoleh pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,15 M dan konsentrasi inhibitor 45% sebesar 89,76%. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *spectrophotometer infra red* (IR) limbah cair tempe mengandung gugus O–H dan C=O. Pada analisis *high performance liquid chromatography* (HPLC) limbah cair tempe mengandung asam laktat sebesar 5%. Hasil analisis *scanning electron microscopy* (SEM) dan *x-ray diffraction* (XRD) menunjukkan kerak CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor terdiri dari kristal fasa gipsum dan basanit, sedangkan setelah penambahan inhibitor terdiri dari kristal fasa gipsum, basanit, dan sedikit anhidrit. Analisis kuantitatif menggunakan *particle size analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel kerak CaSO_4 menjadi lebih kecil dengan adanya penambahan inhibitor berdasarkan nilai rata-rata (*mean*) yaitu dari 20,82 menjadi 9,571 μm dan nilai tengah (*median*) yaitu dari 17,46 menjadi 8,438 μm .

Kata kunci : CaSO_4 , inhibitor, kerak, limbah cair tempe

ABSTRACT

STUDY OF ADDITIONAL TEMPEH'S LIQUID WASTE AS CALCIUM SULFATE (CaSO₄) INHIBITOR USING SEEDED EXPERIMENT METHOD

By

Nurul Rosadinah

In the oil and gas industry, pipe problems are often encountered, for example salt deposition, which is known as scale. One of the scale formed in industrial pipes is calcium sulfate (CaSO₄). The scale on industrial pipes will cause an obstructed fluid flow both in the pipe and in the heat exchanger. To overcome this problem, this study uses tempeh's liquid waste as a scale inhibitor of calcium sulfate (CaSO₄) by using a method of adding crystals seed (seeded experiment) at a temperature of 90 °C with variations in the growth solution concentration 0,1; 0,15; and 0,2 M and inhibitor variations of 5, 15, 25, 35, and 45%. To see the shelf-life of the inhibitor, it was stored for 1, 3, and 7 days. Tempeh's liquid waste with a storage time of 1 day is used as an inhibitor. The most effective percentage value of effectiveness is obtained at 0.15 M growth solution concentration and 45% inhibitor concentration at 89.76%. Based on the analysis of the use of infra red (IR) spectrophotometer, tempeh's liquid waste contains O-H and C=O. In the high performance liquid chromatography (HPLC) analysis, tempeh's liquid waste contains 5% lactic acid. Analysis result of scanning electron microscopy (SEM) and x-ray diffraction (XRD) show that the CaSO₄ scale without the addition of an inhibitor consisted of gypsum and bassanite crystals, while after the addition of inhibitors it consisted of gypsum, bassanite, and a little anhydrite crystal. Gypsum is a type of hardscale crystal, while bassanite and anhydrite are the type of softscale crystal. The quantitative analysis using particle size analyzer (PSA) showed that the particle size distribution of CaSO₄ scale became smaller with the addition of inhibitors based on the average score (mean) from 20.82 to 9.571 µm and the median score from 17.46 to 8.438 µm.

Key words : CaSO₄, inhibitor, scale, tempeh's liquid waste

**STUDI PENAMBAHAN LIMBAH CAIR TEMPE SEBAGAI INHIBITOR
KALSIUM SULFAT (CaSO_4) MENGGUNAKAN METODE *SEDED*
*EXPERIMENT***

Oleh

NURUL ROSADINAH

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
KALSIUM SULFAT (CaSO_4)
MENGUNAKAN METODE *SEDED
EXPERIMENT***

Nama Mahasiswa : **Nurul Rosadinah**

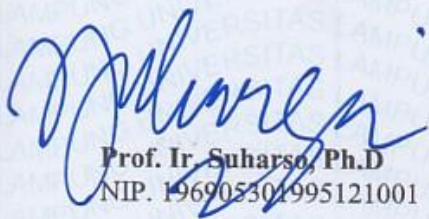
Nomor Pokok Mahasiswa : 1757011010

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

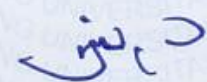


1. Komisi Pembimbing


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


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

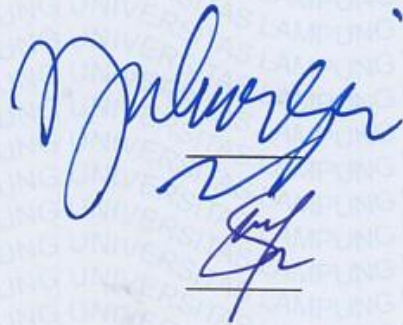
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


Mulyono, Ph.D
NIP. 197406112000031002

MENGESAHKAN

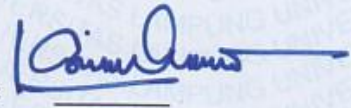
1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Ir. Suharso, Ph.D



Sekretaris : Prof. Dr. Buhani, M.Si

Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 1 Oktober 2021

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nurul Rosadinah
Nomor Pokok Mahasiswa : 1757011010
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Studi Penambahan Limbah Cair Tempe Sebagai Inhibitor Kalsium Sulfat (CaSO_4) 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.

Bandar Lampung, Oktober 2021
Yang Menyatakan



Nurul Rosadinah
NPM. 1757011010

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Nurul Rosadinah dilahirkan di Kelurahan Jagabaya II, Kecamatan Way Halim, Kota Bandar Lampung pada tanggal 28 Desember 1999. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Musa, S.Si dan Ibu Tuti Mulyati. Penulis menyelesaikan pendidikan di TK Aisyiah Bustanul Atfhal Kelapa Tiga pada tahun 2005, lalu

melanjutkan pendidikan di SD Negeri 4 Sukajawa pada tahun 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 7 Bandar Lampung pada tahun 2011. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di SMA Al-Azhar 3 Bandar Lampung pada tahun 2014. Pada tahun 2017 penulis terdaftar menjadi mahasiswa di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur masuk Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Wilayah Barat (SMM PTN-Barat).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi semi finalis Lomba Karya Tulis Ilmiah Nasional (LKTIN) Chemistry Competition Himpunan Mahasiswa Jurusan Kimia Universitas Negeri Medan pada tahun 2019. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Harapan 1 Kategori Umum Lomba Inovasi Tepat Guna (TTG) Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2019. Penulis mengikuti aktivitas

organisasi, dimulai dari menjadi Kader Muda Himaki (KAMI) tahun 2017 dan Garuda Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FMIPA Unila pada tahun 2017, lalu menjadi Staff Departemen Riset dan Teknologi UKMU Sanis dan Teknologi (SAINTEK) Unila pada periode 2018–2019 dan periode 2019–2020. Kemudian penulis juga menjadi Anggota Bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) FMIPA Unila pada periode 2018–2019 dan periode 2019-2020. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada bulan Januari–Februari 2020 di Desa Lengkukai, Kecamatan Kelumbayan, Kabupaten Tanggamus. Pada tahun 2020 penulis telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik, Universitas Lampung dengan judul Studi Penambahan Limbah Cair Tempe Sebagai Inhibitor Kalsium Sulfat (CaSO_4) Metode *Seeded Experiment*.

MOTTO

"Takdir memang seperti ini, sangat menarik. Semula kau ingin berkelana ke utara, tapi dia malah membuatmu terbang ke selatan, bahkan berpindah dengan sukarela." (Giddens Ko)

"Semua mimpi kita akan terwujud, jika kita punya keberanian untuk mengejarnya." (Walt Disney)

"Semua makhluk hebat dalam satu hal, tetapi tidak dalam segala hal." (Spongebob Squarepants)

*"Ilmu berasal dari rezeki Allah: Dia melimpahkannya kepada siapapun yang Dia kehendaki."
(Muhammad bin Ismaa'eel al-Bukhaaree)*

"Tuntutlah ilmu. Di saat kamu miskin, ia akan menjadi hartamu. Di saat kamu kaya, ia akan menjadi perhiasanmu." (Lugman al-Hakim)



Alhamdulillah rabbil 'alamin

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

Kedua orangtuaku, abi dan ibu. Dengan 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, Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., Dr. Ilim, M.S, serta bapak ibu dosen Jurusan Kimia atas ilmu yang diberikan.

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

Serta almanterku tercinta

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Studi Penambahan Limbah Cair Tempe Sebagai Inhibitor Kalsium Sulfat (CaSO_4) Menggunakan Metode *Seeded Experiment***” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Sains di Universitas Lampung.

Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan doa, dukungan, semangat, dan motivasi dari berbagai pihak. Dengan rasa hormat dan tulus dari hati yang paling dalam, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua saya yaitu Abi dan Ibu sudah menghantarkan Nurul sampai menjadi sarjana dan membiayai pendidikan sampai sarjana. Dengan penuh rasa cinta dan kasih sayang dicurahkan untuk mendoakan, menyemangati, menolong, menjadi tempat curhat dan berkeluh kesah, serta memberi kebahagiaan. Nurul mengucapkan terimakasih kepada Abi dan Ibu untuk segalanya. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi, memberkahi, serta memberikan rezeki dan kesehatan kepada Abi dan Ibu, Aamiin yaa rabbal 'aalamiin.
2. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D selaku pembimbing I penulis sudah memberikan dedikasi selama penulis menjadi mahasiswa. Penulis berterima kasih banyak karena Bapak telah memudahkan, melancarkan, memberikan

saran dalam proses pengerjaan skripsi. Semoga Allah SWT senantiasa membalas kebaikan Bapak, Aamiin yaa rabbal 'aaalamiin.

3. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si selaku pembimbing II penulis sudah memberikan kesempatan menjadi mahasiswa bimbingan Ibu. Penulis berterima kasih banyak kepada Ibu sudah melancarkan dan memberikan saran dalam proses pengerjaan skripsi. Semoga Allah SWT senantiasa memberkahi dan membalas kebaikan Ibu, Aamiin yaa rabbal 'aaalamiin.
4. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc selaku penguji penulis. Penulis berterima kasih banyak kepada Bapak sudah banyak membantu, melancarkan, dan memberikan saran kepada penulis. Semoga Allah SWT senantiasa membalas kebaikan Bapak, Aamiin yaa rabbal 'aaalamiin.
5. Ibu Dr. Ilim, M.S selaku pembimbing akademik penulis. Penulis berterima kasih banyak kepada Ibu sudah memberikan bimbingan, nasihat, motivasi, dan saran kepada penulis. Semoga Allah SWT senantiasa membalas kebaikan Ibu, Aamiin yaa rabbal 'aaalamiin.
6. Bapak Mulyono, Ph.D sebagai Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
8. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung atas segala ilmu, pengalaman, motivasi, dan saran selama penulis menjadi mahasiswa di Jurusan Kimia.
9. Adik sepupuku yaitu Ranu memberikan keceriaan kepada Mba Nurul.

10. Sahabat seperbimbingan yaitu Dewi Gustina Sari, M. Sandi Nugraha, dan M. Fauzan telah bertahan sampai di titik ini. Terima kasih atas dukungan, kebahagiaan, dan bantuan kalian. Kalian luar biasa.
11. Sahabat segeng yaitu Saras Khairani, Najma Firdausi, Alya Rahmatina, dan Arifa Rahmatika. Terima kasih sudah menjadi tempat curhat, tempat sambat, tempat bertanya, memberi kebahagiaan, dan mendoakan aku. Aku sayang kalian..
12. Sahabat-sahabatku Nurbaiti, Valennisa Qunifah, dan Jeremia Christian walaupun kita tidak segeng tapi kedekatan kita sangat erat. Terima kasih telah memberikan semangat, ilmu, dan kebahagiaan kepada aku. Sayang deh..
13. Sahabat-sahabat kelas C Jurusan Kimia angkatan 2017 telah memberikan kebahagiaan, semangat, dan keceriaan.
14. Angkatan 2017 Jurusan Kimia telah menambah pertemanan, menambah pengalaman, dan memberikan keceriaan penulis.
15. Teman KKN yang sampai detik ini masih terjalin silaturahmi
16. Sahabat-sahabatku sebelum masuk perguruan tinggi yaitu Nurulina Hakim, Dina Khoirunnisa, Putri Fahmiyatu, Nabila Annida Septasari, Nadila Safitri, Reni Anggraini, Inge Pangesti, Mutiara Devina, dan Diki Setiawan telah memberikan semangat kepada penulis. Luvv kalian..
17. Kakak tingkat dan adek tingkat telah menambah pertemanan dan memberikan pengalaman kepada penulis.
18. Almamater tercinta yaitu Universitas Lampung.

19. Semua pihak yang telah membantu penulis selama menjalankan studi di
Jurusan Kimia

Atas segala kebaikan yang diberikan, semoga Allah SWT senantiasa membalas
kebaikan kepada kalian semua, Aamiin yaa rabbal 'aalamiin.

Bandar Lampung, Oktober 2021
Penulis,

Nurul Rosadinah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan	6
C. Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Kerak.....	7
B. Pengendapan Senyawa Anorganik.....	9
C. Pembentukan Endapan dan Kerak	10
D. Mekanisme Pembentukan Kerak	12
E. Faktor Pembentukan Kristal.....	13
1. Kristalisasi	14
2. Kelarutan Endapan.....	15
3. Derajat Lewat-Jenuh (Supersaturasi).....	16
F. Kalsium Sulfat	19
1. Proses Pembentukan Kerak CaSO_4	20
2. Pengaruh Terbentuknya Kerak CaSO_4	22
G. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak	23
1. Pengendalian pH	23
2. Peningkatan Kondisi Operasi Alat Penukar Panas	23
3. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air	24
4. Inhibitor Kerak.....	24
H. Limbah Cair Tempe	28

I. Bakteri Asam Laktat.....	36
J. Metode Seeded Experiment	38
K. Analisis Menggunakan SEM, XRD, PSA, dan HPLC	38
1. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	39
2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	40
3. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA).....	42
4. <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC).....	44
5. Spektroskopi <i>Infra Red</i> (IR)	47
III. METODOLOGI PENELITIAN	48
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	48
B. Bahan dan Alat.....	48
C. Prosedur Penelitian.....	49
1. Persiapan Limbah Cair Tempe	49
2. Pembuatan Inhibitor.....	49
3. Optimasi Waktu Simpan Inhibitor.....	50
4. Pembuatan Bibit Kristal.....	50
5. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaSO_4 ...	51
6. Analisa Data.....	53
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	54
A. Analisis Gugus Fungsi Limbah Cair Tempe Menggunakan Spektrofotometer <i>Infra Red</i> (IR).....	54
B. Analisis Asam Organik pada Limbah Cair Tempe Menggunakan <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC).....	56
C. Optimasi Waktu Simpan Inhibitor	58
D. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 Tanpa Inhibitor dengan Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan Menggunakan <i>Metode Seeded Experiment</i>	60
E. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Penambahan Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan <i>Metode Seeded Experiment</i>	61
1. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,1 M	63
2. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,15 M	65
3. Penentuan Laju Pertumbuhan Kristal CaSO_4 dengan Variasi Konsentrasi Inhibitor pada Larutan Pertumbuhan 0,2 M	66
F. Perbandingan Larutan Pertumbuhan CaSO_4	69

G. Analisis Morfologi Kristal CaSO_4 Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	71
H. Analisis Struktur Kristal CaSO_4 Menggunakan <i>X-ray Diffraction</i> (XRD)...	73
I. Analisis Distribusi Ukuran Partikel CaSO_4 dengan <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	76
V. SIMPULAN DAN SARAN	78
A. Simpulan	78
B. Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80
LAMPIRAN.....	89

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Analisis Kadar Hara Limbah Cair Tempe.....	33
2. Karakteristik Limbah Cair Tempe	34
3. Gugus Fungsi Limbah Cair Tempe pada Hasil Analisis <i>Infra Red</i> (IR).....	56
4. Hasil Optimasi Asam Laktat dari Larutan Standar Limbah Cair Tempe pada Pengulangan 1×, 2×, dan 3×	57
5. Nilai pH Inhibitor dengan Variasi Waktu Simpan.....	58
6. Nilai pH pada Variasi Konsentrasi Inhibitor Limbah Cair Tempe	62
7. Nilai pH pada Variasi Konsentrasi Inhibitor Limbah Cair Tempe serta Variasi Konsentrasi Larutan Pertumbuhan	62
8. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,1 M.....	65
9. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,15 M.....	66
10. Data Persentase Efektivitas Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan 0,2 M.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Endapan kerak pada pipa	9
2. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air	13
3. Tahapan kristalisasi.....	15
4. Diagram temperatur–konsentrasi	17
5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan.....	26
6. Reaksi hidrolisis polifosfat.....	27
7. Bagan proses pembuatan tempe	30
8. Skema bagan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	40
9. Skema cara kerja <i>X-ray Diffractogram</i> (XRD).....	41
10. Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf.....	43
11. Diagram blok <i>High Performance Liquid Chromatography</i> (HPLC).....	46
12. Cara kerja <i>Infra Red</i> (IR)	47
13. Spektrum <i>Infra Red</i> (IR) limbah cair tempe	55
14. Kromatogram limbah cair tempe	58
15. Grafik perbandingan laju pertumbuhan kristal CaSO_4 pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 M dan konsentrasi inhibitor 25% dengan variasi waktu simpan inhibitor	59

16. Grafik perbandingan laju pertumbuhan kristal CaSO_4 dengan variasi konsentrasi larutan pertumbuhan	60
17. Grafik laju pertumbuhan CaSO_4 dengan menggunakan inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,1 M.....	63
18. Grafik laju pertumbuhan CaSO_4 dengan menggunakan inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,15 M.....	65
19. Grafik laju pertumbuhan CaSO_4 dengan menggunakan inhibitor pada konsentrasi larutan pertumbuhan 0,2 M.....	67
20. Perbandingan larutan pertumbuhan CaSO_4 pada konsentrasi 0,1 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor pada konsentrasi 35%	69
21. Perbandingan kristal CaSO_4 pada konsentrasi 0,1 M (a) tanpa penambahan inhibitor (b) dengan penambahan inhibitor pada konsentrasi 35%	70
22. Morfologi kerak CaSO_4 pada konsentrasi 0,1 M dengan pembesaran 2.500× (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor 25%	71
23. Morfologi kerak CaSO_4 pada konsentrasi 0,1 M dengan pembesaran 6.000× (a) tanpa penambahan inhibitor dan (b) dengan penambahan inhibitor 25%	72
24. Pola <i>X-ray Diffraction</i> (XRD) kerak CaSO_4 tanpa penambahan inhibitor dan dengan penambahan inhibitor	74
25. Grafik distribusi ukuran partikel CaSO_4	76

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Masalah yang dijumpai pada sebagian besar proses industri, yaitu terjadinya pengendapan garam pada dinding-dinding peralatan proses aliran fluida, terutama pada permukaan transfer panas dan permukaan alat-alat evaporasi. Pengendapan ini tidak diharapkan karena penumpukannya menyebabkan timbulnya kerak yang dapat mengganggu transfer panas sehingga mengurangi efisiensi dan menghambat pengaliran pada proses aliran fluida. Selain itu, kerak yang menumpuk pada pipa-pipa saluran, lubang-lubang dan beberapa bagian aliran pada proses aliran fluida dapat menyebabkan gangguan yang serius pada pengoperasian, karena penumpukan kerak ini dapat mengakibatkan terjadinya korosi dan kerusakan pada peralatan proses produksi. Akibatnya biaya dan kerugian yang ditimbulkan sangat besar karena sebagian besar biaya perawatan alat ditujukan untuk mengganti atau memperbaiki komponen yang rusak akibat penumpukan kerak.

Kerak didefinisikan sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Kerak yang terbentuk karena tercapainya proses penyelesaian lewat jenuh. Dalam rangka penyelesaian lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal (Hasson *and* Semiat, 2005). 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 *and* Yassin, 2007). Kerak sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi.

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, serta CO_2 tinggi (Lestari, 2008).

Salah satu cara yang digunakan untuk menghambat pembentukan kerak dengan menambahkan zat penghambat (inhibitor) pada 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). Penggunaan bahan kimia sangat menarik, karena dengan dosis yang sangat rendah dapat mencukupi untuk mencegah kerak dalam periode yang lama (Cowan *and* Weintritt, 1976). Prinsip kerja dari inhibitor kerak adalah pembentukan senyawa kompleks (kelat) antara inhibitor dengan unsur-unsur penyusun kerak. Senyawa kompleks yang terbentuk larut dalam air sehingga menutup kemungkinan pertumbuhan kristal yang besar dan mencegah

kristal kerak untuk melekat pada permukaan pipa (Patton, 1981). Biasanya, penggunaan bahan kimia tambahan untuk mencegah pembentukan kerak didukung dengan penggunaan bola-bola spons untuk membersihkan secara mekanis permukaan bagian dalam pipa.

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 kondesat 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 (Asnawati, 2001).

Provinsi Lampung merupakan salah satu kawasan industri dengan limbah yang cukup besar baik limbah cair maupun limbah padat. Salah satu industri rumah tangga yaitu industri tempe. Produksi tempe akan menghasilkan limbah cair bersifat kental dan berbau asam. Limbah ini oleh pembuat tempe disebut kecutan karena bersifat asam. Limbah cair ini berasal dari rendaman kedelai yang sudah matang dan mengalami fermentasi secara alami. Limbah kecutan ini mengandung asam laktat.

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 di perairan akan sangat mengganggu lingkungan di sekitarnya. 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, fosfor 1,74 ppm, dan besi 4,55 ppm. Jika dimanfaatkan dengan tepat maka akan mengurangi pencemaran lingkungan dan menghilangkan sumber penyakit (Said, 1999).

Riyanto (2006), mengemukakan bahwa 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 (Sugiharto, 1994).

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.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan menggunakan tumbuh-tumbuhan sebagai inhibitor kerak karena dapat diperoleh dengan mudah dan juga ramah lingkungan. Tanaman gambir (*Uncaria gambier roxb*) dapat digunakan sebagai inhibitor kerak CaCO_3 karena mengandung 70% senyawa tanin (Bakhtiar, 1991). Pada penelitian sebelumnya juga digunakan asap cair yang terbuat dari pelepah sawit memiliki kandungan asam organik (asam karboksilat), fenol, aldehid, keton, dan ester. Kandungan utamanya adalah asam asetat sebesar 52,19% (Rahmalinda, dkk., 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.*, 2019). 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.

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 efektivitas limbah cair tempe sebagai inhibitor pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) dengan metode *seeded experiment*, sedangkan analisis morfologi kerak CaSO_4 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

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mempelajari penambahan limbah cair tempe pada berbagai konsentrasi yang dapat menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4).
2. Untuk mengetahui keefektifan limbah cair tempe dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4).

C. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah informasi baru tentang pemanfaatan limbah cair tempe (kecutan) sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4).
2. Memberikan wacana baru meningkatkan nilai ekonomis limbah untuk pemanfaatan limbah cair tempe (kecutan) sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4).
3. Memberi kontribusi pada upaya pengurangan polutan organik, khususnya limbah cair tempe (kecutan) di lingkungan perairan maupun daratan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kerak

Kerak didefinisikan sebagai suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Kerak yang terbentuk karena tercapainya proses penyelesaian lewat jenuh. Dalam rangka penyelesaian lewat jenuh beberapa molekul akan bergabung membentuk inti kristal. Inti kristal ini akan terlarut kembali jika ukurannya lebih kecil dari ukuran partikel kritis sementara kristal-kristal akan berkembang jika 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 mengandung ion lebih rendah dan cenderung untuk menggumpal terbentuklah kerak (Hasson *and* Semiat, 2005).

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. Contoh tipe air yang tidak sesuai adalah air laut dengan konsentrasi SO_4^{2-} tinggi dan konsentrasi Ca^{2+} rendah dan air formasi dengan konsentrasi SO_4^{2-} sangat rendah tetapi konsentrasi Ca^{2+} tinggi.

Campuran air ini menyebabkan terbentuknya endapan CaSO_4 (Badr *and* Yassin, 2007).

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).

Adanya endapan kerak pada komponen pipa, dapat mengakibatkan aliran fluida terhambat baik dalam pipa maupun alat *heat exchangers*. Pada *heat exchangers*, endapan-endapan kerak tersebut akan mengganggu transfer panas sehingga menyebabkan panas akan semakin meningkat. Penyebab terjadinya endapan kerak pada pipa di industri karena terdapatnya senyawa-senyawa pembentuk kerak dalam air dengan jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan sehingga terbentuk kristal. Kristal tersebut akan memperkecil diameter dan menghambat aliran fluida pada sistem pipa tersebut. Terganggunya aliran fluida menyebabkan tekanan semakin tinggi sehingga kemungkinan pipa mengalami kerusakan (Asnawati, 2001) terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Endapan kerak pada pipa (Vendamawan, 2016).

B. Pengendapan Senyawa Anorganik

Endapan didefinisikan sebagai bentuk kristal keras yang menempel pada perpindahan panas permukaan dimana proses penghilangannya dapat dilakukan dengan cara dibor atau didril. Endapan yang berasal dari larutan akan terbentuk karena proses penurunan kelarutan pada kenaikan temperatur operasi dan kristal padat melekat erat pada permukaan logam. Endapan yang umum ditemui di pipa minyak ada beberapa jenis, seperti kalsium karbonat (CaCO_3), kalsium sulfat termasuk gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan kalsium sulfat anhidrat (CaSO_4), serta barium sulfat (BaSO_4) (Asnawati, 2001).

Proses pengendapan senyawa-senyawa anorganik biasa terjadi pada peralatan - peralatan industri yang melibatkan air garam seperti industri minyak dan gas, proses desalinasi dan ketel serta industri kimia. Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur anorganik pembentuk kerak seperti logam kalsium dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan.

Terakumulasinya endapan-endapan dari senyawa anorganik tersebut dapat menimbulkan masalah seperti kerak (Weijnen *and* Marchee, 1983).

Pengerakan dalam pipa adalah suatu proses pembentukan endapan yang terjadi dalam kondisi alami pada suatu pipa yang mengalirkan air dengan kesadahan, temperatur, kecepatan dan konsentrasi tertentu (Ang *et al.*, 2006). Pengerakan dipengaruhi oleh kondisi fisik seperti temperatur, kecepatan aliran, model aliran serta dipengaruhi pula oleh kondisi kimia seperti tingkat kesadahan air yang mengalir dalam pipa, intensitas impuritas yang berada dalam air. Bisa dikatakan disini bahwa kondisi air yang dialirkan itulah yang pada akhirnya menimbulkan permasalahan kerak itu sendiri (Al-Barrak *and* Rowell, 2006).

C. Pembentukan Endapan dan Kerak

Mekanisme pembentukan endapan kerak berhubungan dengan komposisi air di dalam formasi. Secara umum, air mengandung ion-ion terlarut, baik itu berupa kation (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} dan Fe^{3+}), maupun anion (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} dan CO_3^{2-}). Kation dan anion yang terlarut dalam air akan membentuk senyawa yang mengakibatkan terjadinya proses kelarutan. Kelarutan sebagai batas suatu zat yang dapat dilarutkan dalam zat pelarut pada kondisi fisik tertentu. Proses terlarutnya ion-ion dalam air formasi merupakan fungsi dari tekanan, temperatur dan waktu kontak antara air dengan media pembentukan (Ratna, 2011).

Proses pengendapan terjadi melalui 3 tahap, yaitu :

1. Nukleasi

Sebuah inti endapan adalah suatu partikel halus, pembentukan atau pengendapan dapat terjadi secara spontan. 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, fasa awal endapan disebut nukleasi homogen.

2. Pertumbuhan Kristal

Kristal terbentuk dari lapisan ion komponen endapan pada permukaan inti karena pada pengolahan air yang melibatkan proses pengendapan sering tidak mencapai kesetimbangan.

3. Aglomerasi

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

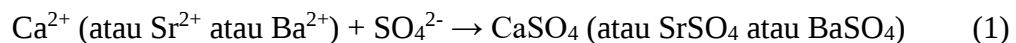
keadaan lewat jenuh. Partikel yang lebih kecil melarut, sebab konsentrasi larutan sekarang belum diketahui harga jenuhnya (Lestari dkk., 2004).

D. Mekanisme Pembentukan Kerak

Pada dasarnya pembentukan kerak terjadi dalam suatu aliran yang bersifat garam jika mengalami penurunan tekanan secara tiba-tiba, maka aliran tersebut menjadi lewat jenuh dan menyebabkan terbentuknya endapan garam yang menumpuk pada dinding-dinding peralatan proses industri. 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 dalam air laut, menghasilkan kerak sulfat seperti CaSO_4).

Adapun persamaan reaksi ditulis dalam persamaan 1 :



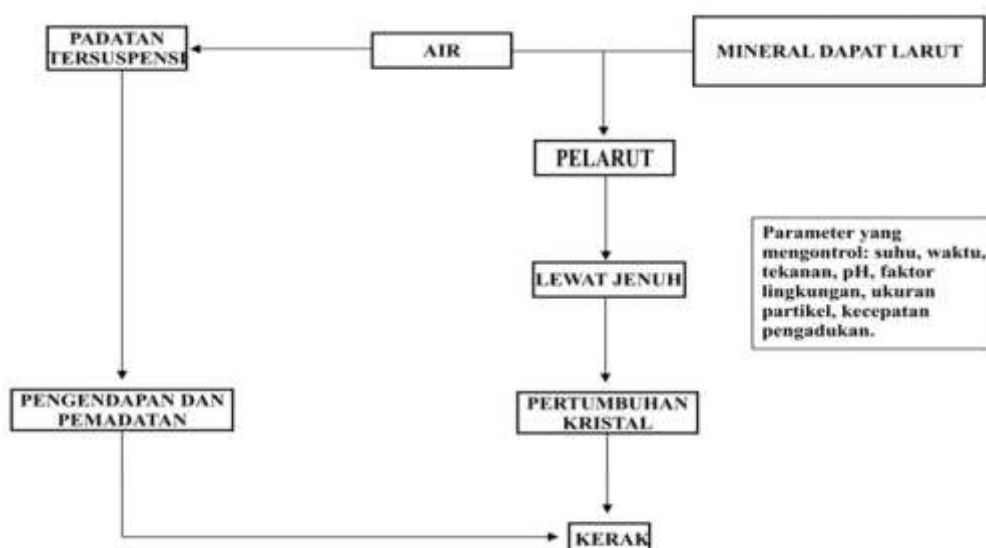
2. Penurunan tekanan dan kenaikan temperatur air garam, yang akan menurunkan kelarutan garam (umumnya mineral yang paling banyak mengendap adalah kerak karbonat seperti CaCO_3).

Adapun persamaan reaksi dapat ditulis dalam persamaan 2 :



3. Penguapan air garam, menghasilkan peningkatan konsentrasi garam melebihi batas kelarutan dan membentuk endapan garam (Amjad, 1995).

Pembentukan kerak dan deposit endapan lain adalah proses kristalisasi yang kompleks. Pada saat larutan menjadi lewat jenuh dan nukleasi terjadi, kondisi ini sangat cocok dan ideal untuk pertumbuhan kristal partikel kerak. Senyawa-senyawa yang dibawa air seperti kalsium sulfat, magnesium sulfat, barium sulfat, magnesium karbonat, kalsium karbonat, silikat, dan lain-lain dapat mengendap dan membentuk kerak sebagai akibat dari beda tekanan, perubahan temperatur, perubahan pH, dan lain-lain. Skema mekanisme pembentukan kerak dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema umum mekanisme pembentukan deposit kerak air (Salimin dan Gunandjar, 2007).

E. Faktor Pembentukan Kristal

Ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan, tergantung terutama pada dua faktor penting, yaitu laju pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal. Laju pembentukan inti dapat dinyatakan dengan jumlah inti yang terbentuk dalam satuan waktu. Jika laju pembentukan inti tinggi, banyak sekali

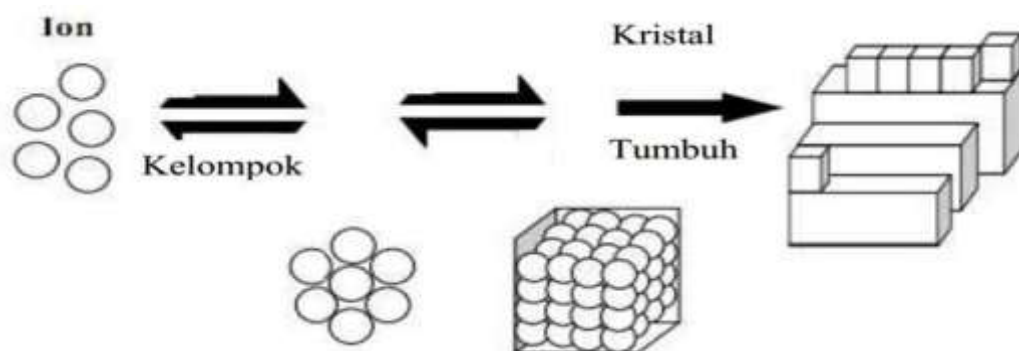
kristal yang akan terbentuk yang terdiri dari partikel-partikel kecil. Laju pembentukan inti tergantung pada derajat lewat jenuh dari larutan. Semakin tinggi derajat lewat jenuh maka semakin besar kemungkinan untuk membentuk inti baru sehingga akan semakin besar laju pembentukan inti. Laju pertumbuhan kristal merupakan faktor penting lainnya yang akan mempengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapan berlangsung. Semakin tinggi laju pertumbuhan maka akan kristal yang terbentuk akan besar. Laju pertumbuhan kristal juga tergantung pada derajat lewat jenuh (Svehla, 1990)

1. Kristalisasi

Kristalisasi adalah suatu proses pembentukan kristal dari larutannya, dimana kristal yang dihasilkan dapat dipisahkan secara mekanik. Pertumbuhan kristal dapat terjadi bila konsentrasi suatu zat terlarut berada pada kadar larutan lewat jenuh pada suhu tertentu. Kondisi kelarutan lewat jenuh dapat diperoleh melalui proses pendinginan dengan larutan pekat panas, penguapan larutan encer, kombinasi proses penguapan dan pendinginan, dan dengan penambahan zat lain untuk menurunkan kelarutannya (Brown, 1978).

Kristalisasi memiliki dua tahap proses, yaitu tahap pembentukan inti yang merupakan tahap mulai terbentuknya zat padat baru, dan tahap pertumbuhan kristal yang merupakan tahap inti zat padat yang baru terbentuk mengalami pertumbuhan menjadi kristal yang lebih besar, akibatnya kristal inti yang pada awalnya hanya memiliki ukuran yang kecil akan berubah menjadi ukuran yang lebih besar. Proses pertumbuhan kristal pada borak merupakan salah satu contoh kasus laju pertumbuhan kristal yang dapat dengan mudah diamati (Brown, 1978;

Suharso, 2004; Suharso, 2005; Suharso, 2005b; Suharso dkk., 2007; Suharso *et al.*, 2008; Suharso, 2008; Suharso *et al.*, 2009; Suharso, 2009; Suharso, 2009b; Suharso dkk., 2010; Suharso, 2010; Suharso, 2010b). Penjelasan sederhana pembentukan kerak (kristalisasi) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan kristalisasi (Zeiher and Williams, 2003).

2. Kelarutan Endapan

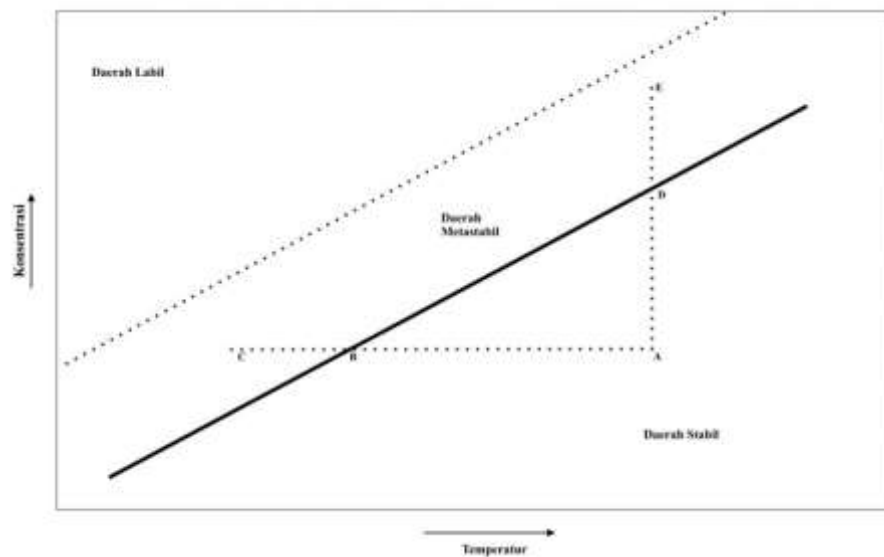
Endapan adalah zat yang memisahkan diri sebagai suatu fase padat dari larutan. Endapan mungkin berupa kristal atau koloid, dan dapat dikeluarkan dari larutan dengan penyaringan atau pemusingan. Endapan terbentuk jika larutan menjadi terlalu jenuh dengan zat bersangkutan. Kelarutan (S) suatu endapan,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

Hasil kali kelarutan memungkinkan 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 fase 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 kompleks. 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 (Supersaturasi)

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 melalui proses pendinginan larutan pekat panas, penguapan larutan encer, kombinasi proses penguapan dan pendinginan serta dengan penambahan zat lain untuk menurunkan kelarutannya. Berdasarkan hal tersebut, terdapat Gambar 4 yang menunjukkan diagram temperature dan konsentrasi.



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. Pada Gambar 4 di atas, kondisi kelarutan dibagi dalam tiga bagian yaitu daerah stabil, metastabil, dan 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).

Menurut (Lestari, 2008) faktor-faktor yang mempengaruhi timbulnya kerak antara lain yaitu :

a. Kualitas Air

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

b. Temperatur Air

Pada umumnya komponen pembentuk kerak cenderung mengendap atau menempel sebagai kerak pada temperatur tinggi. Hal ini disebabkan karena kelarutannya menurun dengan naiknya temperatur. Laju pergerakan mulai meningkat pada temperatur air 50 °C atau lebih dan kadang-kadang kerak terbentuk pada temperatur air diatas 60 °C

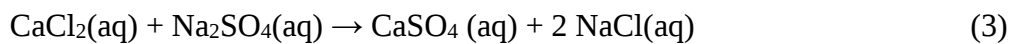
c. Laju Alir Air

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

F. Kalsium Sulfat

Kalsium adalah logam putih perak dan agak lunak yang diproduksi dengan elektrolisis garam kalsium klorida (CaCl_2). Kerak kalsium sulfat merupakan endapan senyawa CaSO_4 (kalsit) yang terbentuk dari hasil reaksi antara ion kalsium (Ca^{2+}) dengan ion sulfat (SO_4^{2-}) ataupun dengan ion bisulfat (HSO_4^-). Kalsium melebur pada 845°C , memiliki massa jenis 2,96 dan titik didih 1450°C . Kalsium membentuk ion kalsium (Ca^{2+}) dalam suatu larutan. Garam dari kalsium biasanya berupa bubuk putih dan membentuk larutan yang tak berwarna kecuali jika anionnya berasal dari ion kompleks maka garamnya akan berwarna (Saito, 1996; Svehla, 1990; Antony *et al.*, 2011) .

Berikut ini adalah reaksi yang menunjukkan terbentuknya kerak kalsium sulfat yang ditunjukkan dalam persamaan 3 dan 4 :



Kalsium membentuk kerak keras ketika berkombinasi dengan sulfat. Kerak CaSO_4 kemudian dapat dihindari jika suhu operasi dipertahankan di bawah 421°C dan dengan memberikan inhibitor kerak (Al-Sofi *et al.*, 1994). CaSO_4 merupakan salah satu jenis kerak non alkali. Kerak ini dikenal dengan tiga bentuk yaitu anhidrat (CaSO_4) stabil pada temperatur 98°C , hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) stabil antara $98\text{--}170^\circ\text{C}$ dan dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Semua ini terbentuk karena adanya perbedaan temperatur dan konsentrasi air laut. Pada air sirkulasi dengan kesadahan kalsium tinggi, kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dapat terendapkan sesuai

dengan temperatur air. Kelarutan CaSO_4 bertambah dengan naiknya temperatur sampai 37°C , kemudian cenderung menurun pada temperatur di atas 37°C (Patel, and Finan, 1994; Hamed *et al.*, 1997; Amjad, 1987).

1. Proses Pembentukan Kerak CaSO_4

Pembentukan kerak CaSO_4 merupakan proses kristalisasi. Kristalisasi adalah peristiwa pembentukan partikel-partikel zat padat dalam suatu fase homogen. Kristalisasi dari larutan dapat terjadi jika padatan terlarut dalam keadaan berlebih (di luar kesetimbangan), maka sistem akan mencapai kesetimbangan dengan cara mengkristalkan padatan terlarut (Dewi dan Masduqi, 2003). Kristalisasi senyawa dalam larutan langsung pada permukaan transfer panas dimana kerak terbentuk memerlukan tiga faktor simultan yaitu konsentrasi lewat jenuh (*supersaturation*), nukleasi (terbentuknya inti kristal) dan waktu kontak yang memadai. Pada saat terjadi penguapan, kondisi jenuh (*saturation*) dan kondisi lewat jenuh (*supersaturation*) dicapai secara simultan melalui pemekatan larutan dan penurunan daya larut setimbang saat kenaikan suhu menjadi suhu penguapan. Pembentukan inti kristal terjadi saat larutan jenuh, dan sewaktu larutan melewati kondisi lewat jenuh maka terjadilah pertumbuhan kristal, ukuran kristal bertambah besar dan selanjutnya melalui gaya gravitasi kristal jatuh dan terpisah dari larutan. Mekanisme tersebut memerlukan waktu kontak antara larutan dan permukaan transfer yang memadai.

Faktor ataupun kondisi yang mempengaruhi pembentukan kerak kalsium sulfat antara lain adalah perubahan kondisi reservoir (tekanan dan temperatur),

alkalinitas air, serta kandungan garam terlarut, dimana kecenderungan terbentuknya kerak kalsium sulfat akan meningkat dengan :

1. Meningkatnya temperatur
2. Penurunan tekanan parsial CO_2
3. Peningkatan pH
4. Laju alir
5. Penurunan kandungan gas terlarut secara keseluruhan

Selain hal-hal yang telah disebutkan di atas, turbulensi aliran dan lamanya waktu kontak (*contact time*) juga berpengaruh terhadap kecepatan pengendapan dan tingkat kekerasan kristal yang terbentuk (Antony *et al.*, 2011).

Proses pembentukan kristal CaSO_4 dapat dikategorikan dalam tiga tahapan pokok, yaitu :

1. Tahap Pembentukan Inti (Nukleasi)

Ion-ion yang terkandung dalam suatu fluida akan mengalami reaksi kimia untuk membentuk inti kristal. Inti kristal yang terbentuk halus sehingga tidak akan mengendap dalam proses aliran.

2. Tahap Pertumbuhan Inti

Pertumbuhan inti kristal akan menarik molekul-molekul yang lain, sehingga inti akan tumbuh menjadi butiran yang lebih besar, dengan diameter 0,001–0,1 μ (ukuran koloid), kemudian tumbuh lagi sampai diameter 0,1–10 μ (kristal halus). Kristal akan mulai mengendap saat pertumbuhannya mencapai diameter > 10 μ (kristal kasar).

3. Tahap Pengendapan

Kecepatan pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh ukuran dan berat jenis kristal yang membesar pada tahap sebelumnya. Proses pembentukan juga dipengaruhi oleh aliran fluida pembawa, ketika kristal akan mengendap apabila kecepatan pengendapan lebih besar dari kecepatan aliran fluida (Siswoyo dan Erna, 2005).

2. Pengaruh Terbentuknya Kerak CaSO_4

Endapan kerak merupakan salah satu masalah penting dan umumnya terbentuk di pipa-pipa peralatan industri. Contohnya pada sistem injeksi air yang umumnya ada di ladang minyak, banyaknya kerak akan menurunkan produksi minyak dan gas (Badr *and* Yassin, 2007). Pada penelitian Halimatuddahlia (2003) menyimpulkan bahwa pembentukan kerak pada operasi produksi minyak bumi dapat mengurangi produktivitas sumur akibat tersumbatnya pipa, pompa, dan katub.

Kerak yang terbentuk pada pipa-pipa peralatan industri akan memperkecil diameter dan menghambat aliran fluida pada sistem pipa tersebut. Terganggunya aliran fluida menyebabkan suhu semakin naik dan tekanan semakin tinggi sehingga kemungkinan pipa akan pecah (Asnawati, 2001). Endapan kerak yang banyak dijumpai pada peralatan-peralatan industri minyak dan gas, ketel serta industri kimia salah satunya adalah kerak CaSO_4 (Badr *and* Yassin, 2007; Lestari, 2000). Oleh karena itu perlu dilakukan pencegahan pembentukan kerak untuk mengurangi atau menghilangkan kerak kalsium sulfat yang terdapat pada peralatan-peralatan industri.

G. Metode Pencegahan Terbentuknya Kerak

Beberapa metode yang digunakan untuk mencegah terbentuknya kerak CaSO_4 pada peralatan-peralatan industri antara lain:

1. Pengendalian pH

Pengendalian pH dengan penginjeksian asam (asam sulfat atau asam klorida) telah lama diterapkan untuk mencegah pengendapan oleh garam-garam kalsium, garam logam bivalen dan garam fosfat. Kelarutan 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. Lagipula, asam sulfat dan asam klorida mempunyai tingkat bahaya yang cukup tinggi dalam penanganannya. Saat ini penghambatan kerak dengan hanya menginjeksikan asam semakin jarang digunakan (Lestari dkk., 2004).

2. Peningkatan Kondisi Operasi Alat Penukar Panas

Laju timbulnya kerak dipengaruhi oleh laju alir air, temperatur air, dan temperatur dinding luar penukar panas. Oleh karena itu, salah satu metode penghambatan kerak yang efektif adalah dengan pengendalian kondisi operasi pada dinding luar alat penukar panas. Namun, hal ini hanyalah sebagai pelengkap dan bahan penghambat kerak tetap diperlukan untuk pencegahan timbulnya kerak yang memadai.

3. Pelunakan dan Pembebasan Mineral Air

Untuk mencegah terjadinya kerak pada air yang mengandung kesadahan air (kira-kira 250 ppm CaSO_4) 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. 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 dkk., 2004). Namun, penggunaan air bebas mineral membutuhkan biaya yang cukup tinggi untuk digunakan dalam industri skala besar sehingga dapat menurunkan efisiensi kerja.

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. 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). Penggunaan bahan kimia sangat menarik, karena dengan dosis yang sangat rendah dapat mencukupi untuk mencegah kerak dalam periode yang lama (Cowan and Weintritt, 1976). Prinsip kerja dari inhibitor kerak adalah pembentukan senyawa

kompleks (kelat) antara inhibitor dengan unsur-unsur penyusun kerak. Senyawa kompleks yang terbentuk larut dalam air sehingga menutup kemungkinan pertumbuhan kristal yang besar dan mencegah kristal kerak untuk melekat pada permukaan pipa (Patton, 1981). Biasanya, penggunaan bahan kimia tambahan untuk mencegah pembentukan kerak didukung dengan penggunaan bola-bola spons untuk membersihkan secara mekanis permukaan bagian dalam pipa. Pemilihan inhibitor yang tepat dapat memberikan pengurangan yang murah dan efektif dalam pembentukan kerak, karena konsentrasi yang rendah dapat berdampak besar pada pertumbuhan kristal. Penelitian tentang penghambat kerak didorong oleh kebutuhan industri yang kuat untuk penghambat yang efektif (Suharso *et al.*, 2017).

Terdapat beberapa syarat yang harus dimiliki senyawa kimia sebagai inhibitor kerak yaitu (Al-Deffeeri, 2006) :

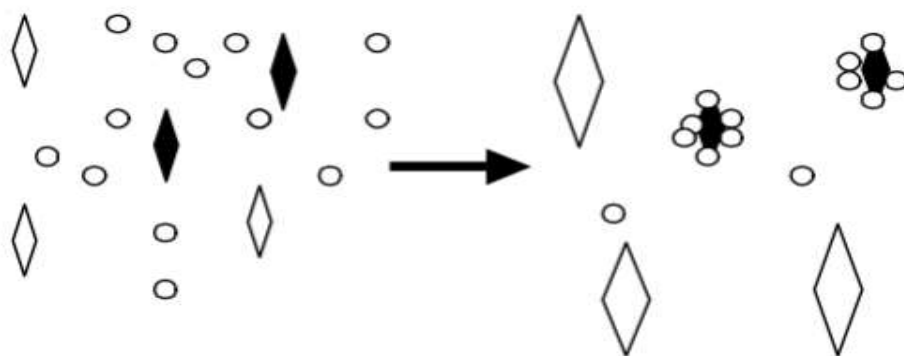
- a. Menunjukkan kestabilan termal yang cukup efektif untuk mencegah terbentuknya air sadah dari pembentukan kerak,
- b. Merusak struktur kristal dari padatan tersuspensi lain yang mungkin akan terbentuk, dan
- c. Memiliki tingkat keamanan yang tinggi dalam penggunaannya sehingga tidak menimbulkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan sekitar.

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

1. Inhibitor kerak dapat mengadsorpsi pada permukaan kristal kerak pada saat mulai terbentuk. Inhibitor merupakan kristal yang besar yang dapat menutupi kristal yang kecil dan menghalangi pertumbuhan selanjutnya,

2. Dalam banyak hal bahan kimia dapat dengan mudah mencegah menempelnya suatu partikel-partikel pada permukaan padatan.

Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dapat diilustrasikan pada Gambar 5. Gambar 5 memberikan gambaran bagaimana kerja inhibitor dalam mengadsorpsi pada sisi-sisi pertumbuhan kristal dari bibit kristal (ditunjukkan pada kristal yang diberi warna hitam) yang mengakibatkan pertumbuhan kristal menjadi terhambat. Sedangkan pada bibit kristal yang tidak teradsorpsi oleh inhibitor (ditunjukkan pada kristal yang tidak diberi warna) mengalami pertumbuhan normal (Suharso *et al.*, 2009; Suharso *et al.*, 2014).

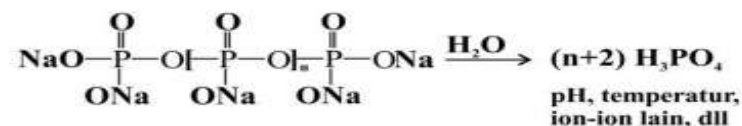


Gambar 5. Mekanisme inhibitor dalam menghambat laju pertumbuhan kristal dalam larutan pertumbuhan (o = inhibitor, $\diamond$ = bibit kristal) (Suharso *et al.*, 2009; Suharso *et al.*, 2014).

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 (Asnawati, 2001).

Inhibitor kerak yang pernah digunakan adalah polimer-polimer yang larut dalam air dan senyawa fosfonat. Salah satu inhibitor kerak dari polimer-polimer yang larut dalam air adalah polifosfat. Polifosfat merupakan inhibitor kerak yang murah namun keefektifannya terbatas. Keunggulan polifosfat sebagai inhibitor kerak kalsium sulfat (CaSO_4) antara lain karena kemampuannya untuk menyerap pada permukaan kristal yang mikroskopik, menghambat pertumbuhan kristal pada batas konsentrasi rendah dan strukturnya yang mampu merusak padatan tersuspensi. Hal ini dapat mencegah pertumbuhan kristal lebih lanjut, atau setidaknya memperlambat proses pertumbuhan kerak. Namun, polifosfat memiliki kelemahan utama yaitu mudah terhidrolisis pada temperatur di atas 90°C menghasilkan ortofosfat. Reaksi hidrolisis polifosfat di tunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Reaksi hidrolisis polifosfat (Gill, 1999).

Gambar 6 adalah reaksi hidrolisis polifosfat yang merupakan fungsi dari temperatur, pH, waktu, dan adanya ion-ion lain. Ortofosfat yang dihasilkan dapat menyebabkan menurunnya kemampuan untuk menghambat pertumbuhan kerak dan menyebabkan terbentuknya kerak baru dari presipitasi kalsium fosfat (Gill, 1999), sehingga penggunaan polifosfat sebagai inhibitor kerak hanya efektif pada temperatur rendah (Al-Deffeeri, 2006).

Perubahan ukuran kristal yang terjadi pada kristal CaSO_4 tanpa inhibitor dan dengan inhibitor disebabkan oleh peran inhibitor yang menghambat permukaan kristal CaSO_4 melalui adsorpsi pada permukaan kristal atau inti kristal.

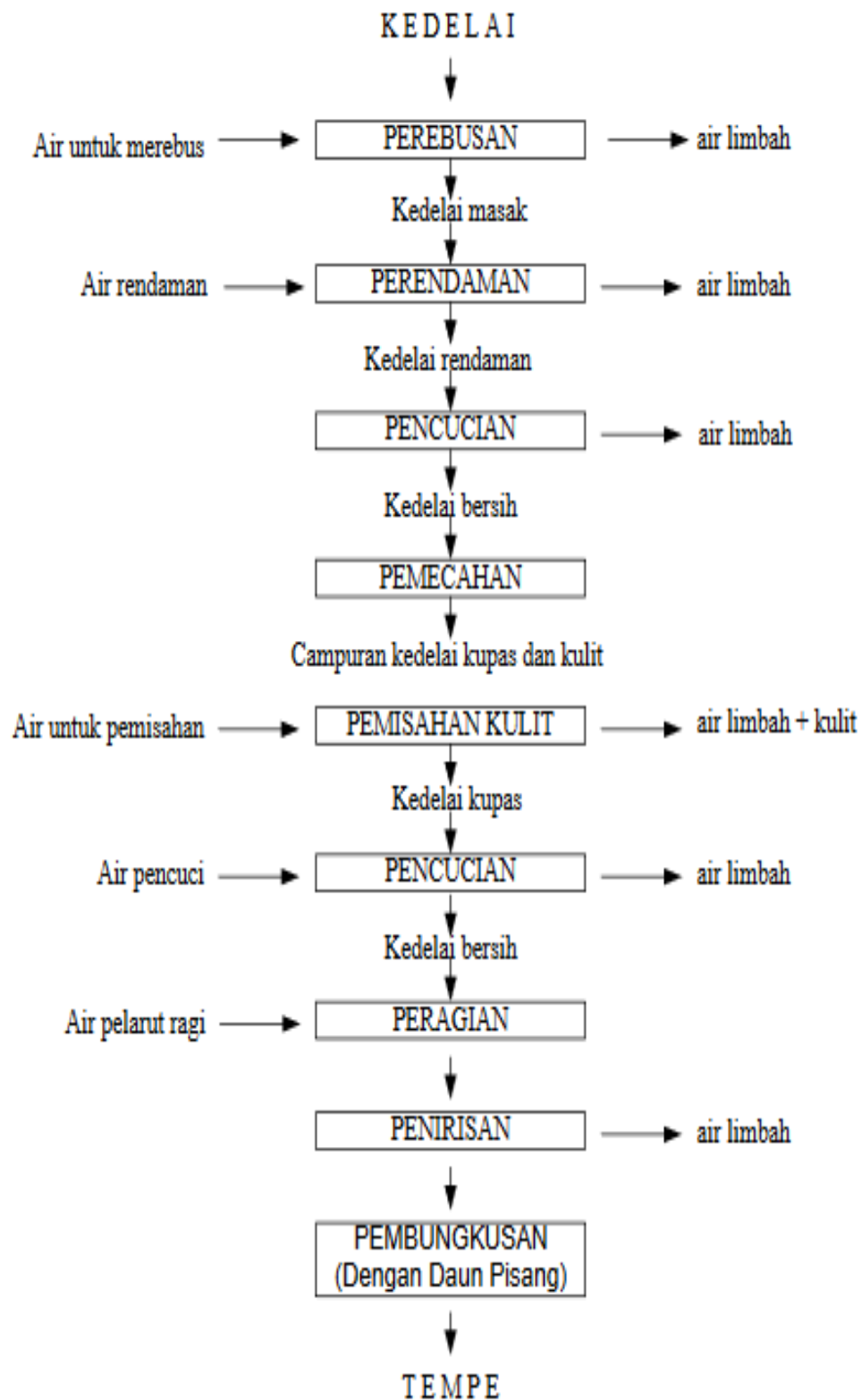
Penghambatan unit pertumbuhan oleh inhibitor menyebabkan laju pertumbuhan kerak CaSO_4 melambat. Penghambatan pertumbuhan kristal CaSO_4 akan mengakibatkan perubahan ukuran kristal CaSO_4 . Hal ini sejalan dengan penelitian Sikirić dan Milhofer, yang meneliti pengaruh molekul organik terhadap kristalisasi biomineral dalam larutan yang menunjukkan perubahan laju pertumbuhan dan morfologi kristal kerak biomineral akibat penambahan molekul organik dengan tertentu. kelompok fungsional (Suharso *et al.*, 2019).

H. Limbah Cair 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).

Proses produksi tempe, memerlukan banyak air yang digunakan untuk perendaman, perebusan, pencucian serta pengupasan kulit kedelai. Limbah yang diperoleh dari proses-proses tersebut di atas dapat berupa limbah cair maupun limbah padat. Sebagian besar limbah padat yang berasal dari kulit kedelai, kedelai yang rusak dan mengambang pada proses pencucian serta lembaga yang lepas pada waktu pelepasan kulit, sudah banyak yang dimanfaatkan untuk makanan ternak. Limbah cair berupa air bekas rendaman kedelai dan air bekas rebusan kedelai masih dibuang langsung diperairan disekitarnya (Wiryani, 2020).

Sumber air limbah tempe berasal dari proses pembuatan, baik dari pencucian bahan baku sampai perebusan. Secara umum sumber limbah cair tempe dapat dilihat dari diagram alir proses pembuatan tempe sebagai berikut:



Gambar 7. Bagan proses pembuatan tempe (Said dan Herlambang, 2003).

Menurut Anonim (2020) sumber limbah cair tempe dari setiap tahapan proses pembuatan :

a. Pencucian kedelai

Proses pencucian kedelai dilakukan untuk membersihkan biji kedelai dari kotoran tanah. Biasanya proses ini dilakukan beberapa kali sampai biji kedelai benar-benar bersih. Proses ini dihasilkan limbah cair yang cukup banyak yaitu kurang lebih 300 liter atau 60% dari seluruh limbah cair yang dihasilkan.

b. Perendaman kedelai

Proses perendaman dimaksudkan untuk melepaskan kulit dari biji kedelai. Proses ini dilakukan kurang lebih selama 12 jam. Kemudian air rendaman dibuang dan kedelai dicuci hingga bersih. Proses ini dihasilkan limbah padat (kulit kedelai) dan limbah cair kurang lebih sebanyak 100 liter atau 20% dari seluruh limbah cair yang dihasilkan.

c. Perebusan kedelai

Umumnya perebusan kedelai dilakukan dua kali tahapan, yaitu perebusan setengah matang pada tahapan pertama dan perebusan matang pada tahapan kedua. Setelah direbus kemudian air ditiriskan. Proses penirisan tersebut dihasilkan limbah cair yang sangat keruh dan berwarna kekuningan kurang lebih sebanyak 50 liter, sehingga limbah yang dihasilkan selama dua kali proses perebusan mencapai kurang lebih 100 liter atau 20% dari seluruh limbah cair yang dihasilkan.

Karakter limbah cair yang dihasilkan berupa bahan organik padatan tersuspensi (kulit, selaput lendir dan bahan organik lain). Warna putih keruh pada air limbah berasal dari pembuangan air rendaman dan pengelupasan kulit kedelai yang masih

banyak mengandung pati, juga berasal dari air bekas pencucian peralatan proses produksi, peralatan dapur dan peralatan lainnya. Bau yang timbul karena adanya aktivitas mikroorganisme yang menguraikan zat organik atau dari reaksi kimia yang terjadi dan menghasilkan gas tertentu (Wignyanto dkk., 2009)

Riyanto (2006), mengemukakan bahwa 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. Oleh sebab itu penting untuk ditindaklanjuti. 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).

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 1.

Tabel 1. Analisis Kadar Hara Limbah Cair Tempe (Said, 1999)

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

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 (Notohadiprawiro, 1999). 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 %.

Berdasarkan penelitian Ratnani (2011) diperoleh hasil analisis kandungan limbah cair dari proses pembuatan tempe yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Limbah Cair Tempe (Ratnani, 2011)

Parameter	Hasil Analisis Kandungan Limbah Cair Tempe
pH	4,16
DO (ppm)	Tidak terdeteksi
COD (ppm)	35,395
Air (%)	15,3
Abu (%)	0,7
Karbohidrat (%)	1,9
Protein (%)	8,1
Lemak (%)	4,8
Nitrogen	1,6
Fosfor	3,26
Kalium	1,32
Serat kasar (%)	30,9
Temperatur (°C)	32
Warna	Kuning
Warna	Berbau menyengat

Menurut Anonim (2020) sifat air limbah industri tempe yang perlu diketahui antara lain :

a. Temperatur

Temperatur air limbah industri tempe biasanya lebih tinggi dari temperatur normal di badan air, karena dalam proses pembuatan tempe selalu pada temperatur panas baik pada saat perebusan atau pada saat penyaringan yaitu pada suhu 60–80 °C.

b. Warna

Warna air buangan biasanya transparan sampai kuning muda disertai adanya suspensi warna putih. Zat terlarut dan tersuspensi yang mengalami penguraian hayati maupun kimia akan berubah warna. Proses ini merupakan proses yang paling merugikan, karena adanya proses dimana kadar oksigen di dalam air buangan menjadi 0 (nol) maka air buangan berubah menjadi hitam dan busuk (Nurhasan dan Pramudyanto, 1991).

c. Bau

Bau air buangan industri tempe dikarenakan proses pemecahan protein oleh mikroba alam. Bau dalam saluran akan menyengat apabila saluran tersebut sudah berubah anaerob. Bau tersebut karena proses terpecahnya penyusun dari protein dan karbohidrat sehingga timbul bau busuk dari gas H_2S .

d. Kekeruhan

Padatan yang terlarut dan tersuspensi dalam air limbah industri tempe menyebabkan air keruh. Zat yang menyebabkan air keruh adalah zat organik atau zat yang tersuspensi dari kulit kedelai, sedangkan zat organik terlarut yang sudah terpecah menyebabkan air limbah berubah seperti emulsi keruh.

e. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

Padatan yang terdapat dalam air buangan terdiri dari zat organik dan zat anorganik. Zat organik tersebut misalnya protein, karbohidrat, lemak dan minyak. Protein dan karbohidrat biasanya lebih mudah terpecah secara proses hayati menghasilkan amoniak, sulfida dan asam-asam lainnya. Sedangkan lemak lebih stabil terhadap pengrusakan hayati. Adanya lemak pada limbah tempe ditandai dengan adanya zat-zat terapung berbentuk skum. Untuk

mengetahui berapa besarnya jumlah zat organik yang terlarut dalam limbah dapat diketahui dengan melihat besarnya angka BOD atau Kebutuhan Oksigen Biokimia (KOB). Angka BOD ini menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk keperluan aktivitas mikroba dalam memecah zat organik biodegradasi di dalam air buangan.

f. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Parameter ini dalam air buangan juga menunjukkan zat organik, terutama zat organik nonbiodegradasi, selain itu zat dapat dioksidasi oleh bahan kimia $K_2Cr_2O_7$ dalam asam, misalnya SO_3 (sulfit), NO_2 (nitrit) kadar tinggi dan zat-zat reduktor lainnya. Besarnya angka COD biasanya lebih besar dari BOD, biasanya dua kali sampai tiga kali besarnya BOD.

g. pH

pH dalam air limbah sangat dipengaruhi oleh kegiatan mikroba dalam pemecahan bahan organik. Air limbah cenderung asam dan pada keadaan asam ini terlepas zat-zat yang mudah menjadi gas.

I. Bakteri Asam Laktat

Bakteri Asam Laktat (BAL) adalah kelompok bakteri Gram positif berbentuk kokus atau batang, tidak membentuk spora, suhu optimum pertumbuhan $\pm 40^\circ C$, 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).

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) yaitu 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 yang menghasilkan dua molekul asam laktat dari fermentasi glukosa termasuk didalam kelompok bakteri asam laktat bersifat homo fermentatif, sedangkan Bakteri Asam Laktat yang menghasilkan satu molekul asam laktat dan satu molekul etanol serta satu molekul karbondioksida dikenal dalam kelompok Bakteri asam laktat bersifat hetero fermentatif (Reddy *et al.*, 2008).

J. Metode Seeded Experiment

Menurut Rahmania (2012) 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 akan 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 (*seeded experiment*).

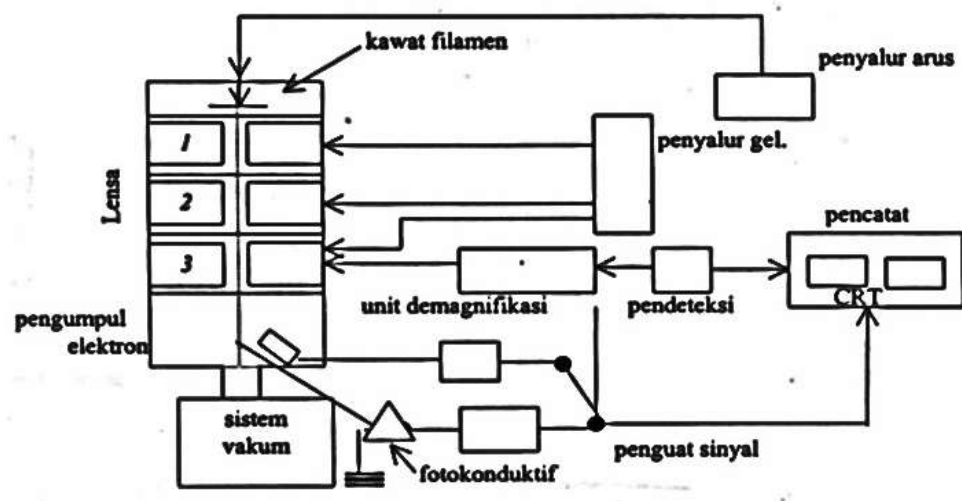
K. Analisis Menggunakan IR, HPLC SEM, XRD, dan PSA

Pada penelitian ini dilakukan beberapa analisis terhadap kristal CaSO_4 yang terbentuk. Analisis tersebut meliputi analisis gugus fungsi dan komponen kimia terhadap limbah cair tempe dengan menggunakan *spektrofotometer infrared* (IR) dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC), morfologi permukaan kristal CaSO_4 menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-ray Diffactogram* (XRD), serta analisis distribusi ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA). Analisis ini dilakukan agar dapat mengetahui seberapa efektif limbah cair tempe dalam menghambat pembentukan kerak CaSO_4 .

1. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (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 *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan radiasi elektron yang mempunyai $\lambda = 200\text{--}0,1 \text{ \AA}$, 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 *Scanning Electron Microscopy* (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 dkk., 2004). Skema bagan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skema bagan *Scanning Elektron Microscopy* (SEM) (Gabriel, 1985).

2. 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).

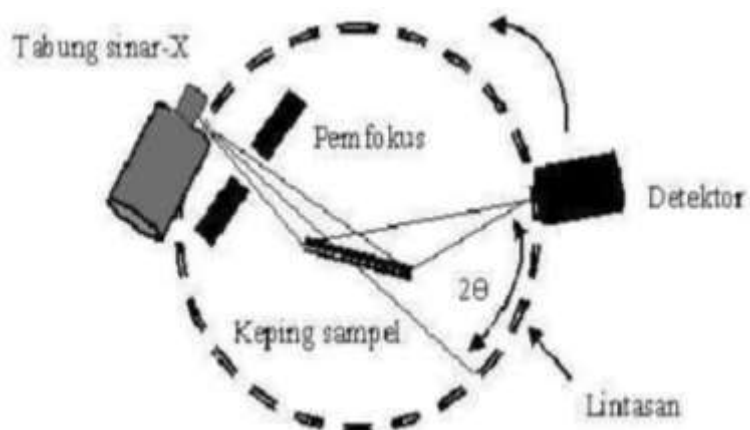
Analisis difraksi sinar-X didasarkan pada susunan sistematis atom-atom atau ion di dalam bidang kristal yang dapat tersusun sedemikian rupa sehingga membentuk kisi kristal dengan jarak antar bidang (d) yang khas. Setiap spesies mineral mempunyai susunan atom yang berbeda-beda sehingga membentuk bidang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

karakteristik. Pola difraksi inilah yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi suatu senyawa (Rini, 2016).

Kegunaan analisis *X-ray Diffractogram* (XRD) di antaranya adalah :

- a. Analisis kualitatif dan penetapan semi-kuantitatif.
- b. Menentukan struktur kristal pengindeksian bidang kristal, dan kedudukan atom dalam kristal.
- c. Untuk analisis kimia (identifikasi zat yang belum diketahui, penentuan kemurnian senyawa, dan deteksi senyawa baru).

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



Gambar 9. Skema cara kerja *X-ray Diffractogram* (XRD) (Menik, 2010).

3. Particle Size Analyzer (PSA)

Analisis ukuran partikel adalah sebuah sifat fundamental dari endapan suatu partikel yang dapat memberikan informasi tentang asal dan sejarah partikel tersebut. Distribusi ukuran juga merupakan hal penting seperti untuk menilai perilaku granular yang digunakan oleh suatu senyawa atau gaya gravitasi. Diantara senyawa-senyawa dalam tubuh hanya ada satu partikel yang berkarakteristik dimensi linear. Partikel irregular memiliki banyak sifat dari beberapa karakteristik dimensi linear (James *and* Syvitski, 1991).

Perhitungan partikel secara modern umumnya menggunakan alinasis gambar atau beberapa jenis penghitung partikel. Gambar didapatkan secara tradisional dengan mikroskop elektron atau untuk partikel yang lebih kecil menggunakan SEM (James *and* Syvitski, 1991). 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 (Totoki *et al.*, 2007).

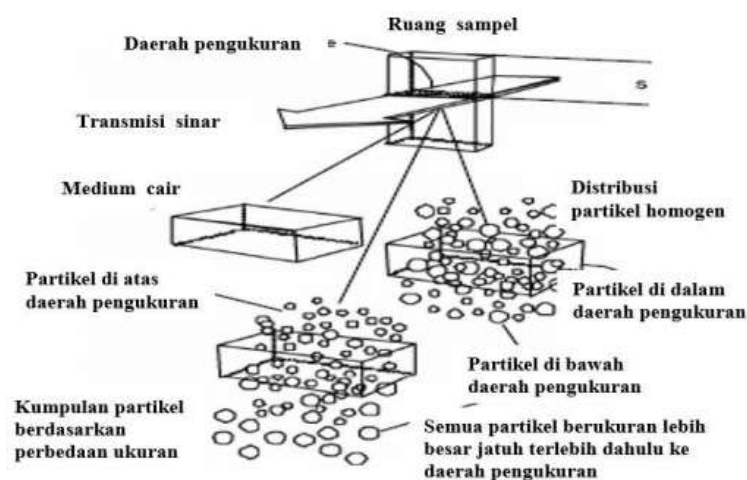
Particle size analyzer (PSA) mampu mengukur partikel distribusi ukuran emulsi, suspensi dan bubuk kering (Totoki *et al.*, 2007).

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 (Hossaeen, 2000).

Sampel berupa padatan lebih banyak mengabsorpsi sinar-X daripada cairan, oleh karena itu transmisi sinar-X dikurangi. Sejak pencampuran suspensi yang homogen, intensitas diasumsikan sebagai nilai konstan, I_{min} untuk transmisi sinar X dalam skala pengurangan yang penuh. Aliran pencampuran dihentikan dan penyebaran yang homogen dimulai untuk menyelesaikan pentransmisian intensitas sinar-X yang dimonitor pada *depth* - s. Selama proses sedimentasi, partikel yang besar menempati tempat pertama di bawah zona pengukuran dan pada akhirnya, semua partikel menempati level ini dan yang tertinggal hanya cairan yang bersih. Semakin banyak partikel besar yang menempati di bawah zona pengukuran dan tidak digantikan dengan ukuran partikel yang sama yang menempati dari atas, maka pelemahan sinar-X berkurang. Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf dapat ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram proses fraksinasi massa dalam sedigraf (Webb, 2006).

4. High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

HPLC adalah singkatan dari *High Performance Liquid Chromatography*, yaitu alat yang berfungsi mendorong analit melalui sebuah kolom dari fase diam (yaitu sebuah tube dengan partikel bulat kecil dengan permukaan kimia tertentu) dengan memompa cairan (fase bergerak) pada tekanan tinggi melalui kolom. *High Performance Liquid Chromatography* (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 (Khopkar, 2003).

High Performance Liquid Chromatography (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).

Prinsip kerja dari *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) adalah dengan bantuan pompa fasa gerak cair dialirkan melalui kolom ke detektor. Kemudian cuplikan dimasukkan ke dalam aliran fasa gerak dengan cara penyuntikan. Di dalam kolom terjadi pemisahan komponen-komponen campuran. Karena perbedaan kekuatan interaksi antara *solute-solute* terhadap fasa diam.

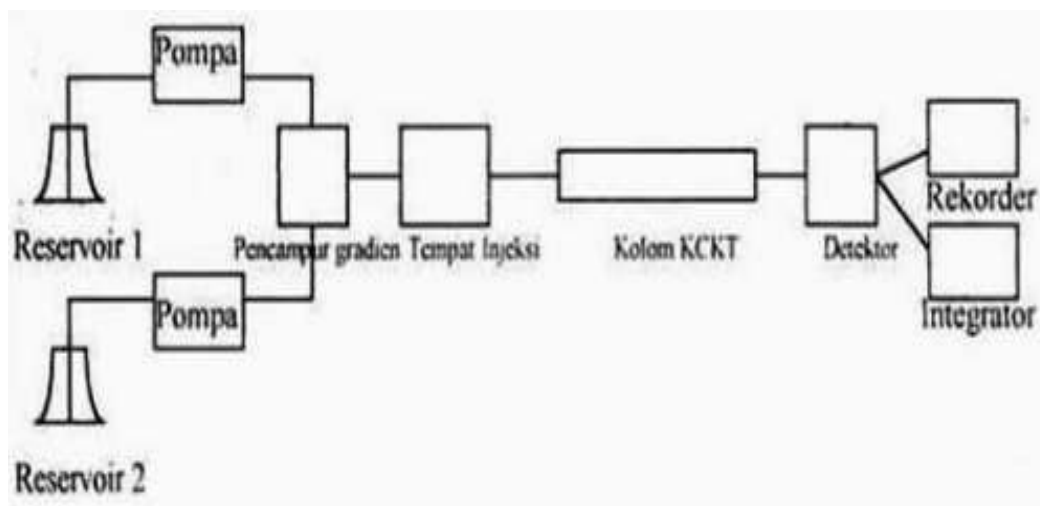
Solute-solute yang kurang kuat interaksinya dengan fasa diam akan keluar dari kolom lebih dulu. Sebaliknya, solut-solut yang kuat berinteraksi dengan fasa diam maka solute-solut tersebut akan keluar kolom dideteksi oleh detektor kemudian direkam dalam bentuk kromatogram kromatografi gas. Seperti pada kromatografi gas, jumlah peak menyatakan konsentrasi komponen dalam campuran. Komputer dapat digunakan untuk mengontrol kerja sistem *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dan mengumpulkan serta mengolah data hasil pengukuran *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) (Khopkar, 2003).

High Performance Liquid Chromatography (HPLC) biasanya menggunakan kolom dengan diameter yang kecil yaitu 2-8 mm dan memiliki ukuran penunjang partikel 50 mm. Sedangkan laju aliran dipertinggi dengan tekanan yang tinggi. *High Performance Liquid Chromatography* (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), *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC)

memiliki beberapa keunggulan yaitu:

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

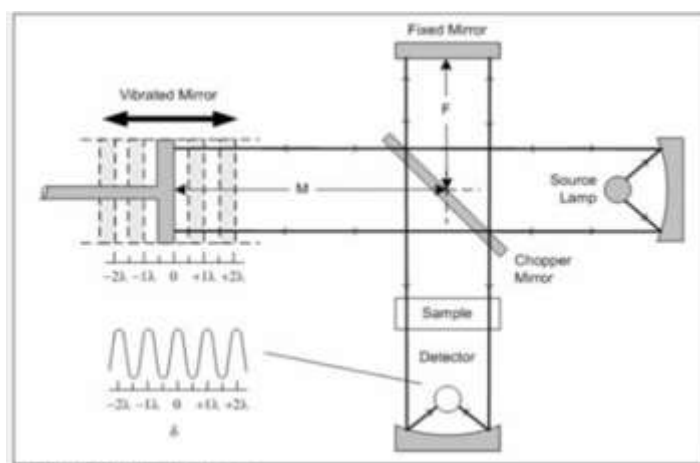


Gambar 11. Diagram blok *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) (Putra, 2004).

5. Spektroskopi *Infra Red* (IR)

Spektrofotometer IR adalah spektrofotometer yang menggunakan sinar IR dekat, yakni sinar yang berada pada jangkauan panjang gelombang $2,5 - 25 \mu\text{m}$ atau jangkauan frekuensi $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Sinar ini muncul akibat vibrasi atom-atom padaposisi kesetimbangan dalam molekul dan kombinasi vibrasi dengan rotasi menghasilkan spektrum vibrasi-rotasi (Khopkar, 2001).

Spektrum IR suatu molekul adalah hasil transisi antara tingkat energi vibrasi dan osilasi. Bila molekul menyerap radiasi IR, energi yang diserap akan menyebabkan kenaikan amplitude getaran atom-atom yang terikat sehingga molekul-molekul tersebut berada pada keadaan vibrasi tereksitasi (excited vibrational state); energi yang diserap ini akan dibuang dalam bentuk panas bila molekul itu kembali ke keadaan dasar. Dengan demikian spektrofotometer IR dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya gugus fungsi dalam suatu molekul (Supratman, 2010).



Gambar 12. Cara kerja *Infra Red* (IR) (Anonim, 2008).

III. METODOLOGI 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 Juni 2021. Analisis menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dan *Infra Red* (IR) dilakukan di Balai Penerapan dan Pengkajian Teknologi (BPPT) Lampung, analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di UPT Laboratorium Teknologi dan Sentra Inovasi Terpadu (LTSIT) Universitas Lampung, analisis menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dilakukan di Laboratorium Sentral Universitas Padjajaran, dan analisis menggunakan *X-ray Diffactogram* (XRD) dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Sepuluh November.

B. Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah CaCl_2 anhidrat, Na_2SO_4 , akuades, limbah cair tempe, dan kertas saring.

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat-alat gelas yang sering digunakan di laboratorium, *water bath* merek *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* (XRD) 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.

C. Prosedur Penelitian

1. Persiapan Limbah Cair Tempe

Pada penelitian ini digunakan limbah cair tempe yang diambil dari industri tempe Kelurahan Surabaya Kecamatan Kedaton Bandar Lampung. Kemudian limbah cair tempe disentrifugasi dengan kecepatan 2500 rpm selama 30 menit dan diambil filtrat dari hasil sentrifugasi tersebut.

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 25 mL limbah cair tempe, lalu diencerkan dengan akuades dalam labu ukur 500 mL, kemudian dihomogenkan. Perlakuan yang sama dilakukan untuk pembuatan larutan inhibitor dengan konsentrasi 15, 25, 35, dan 45%.

3. 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 disentrifugasi dengan kecepatan 2500 rpm selama 30 menit dan diukur pH nya menggunakan pH meter. Limbah cair tempe yang sudah disentrifugasi digunakan sebagai inhibitor 25% pada larutan pertumbuhan 0,1 M CaSO_4 selanjutnya dibandingkan perubahan rendemen kerak dengan larutan pertumbuhan 0,1 M CaSO_4 tanpa inhibitor untuk dapat mengetahui keefektifan limbah cair tempe pada kondisi optimum. Untuk mengetahui komponen senyawa kimia yang terdapat pada limbah cair tempe, limbah cair tempe dengan waktu simpan 1 hari yang berupa filtrat dilakukan karakterisasi menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC). Untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam limbah cair tempe, limbah cair tempe dengan waktu simpan 1 hari yang berupa filtrat dilakukan karakterisasi menggunakan *Infra Red* (IR).

4. 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_2SO_4 35,5 g dilarutkan dalam akuades dengan volume total 250 mL kemudian diaduk dengan magnetik stirer pada suhu 90 °C selama 15 menit. Larutan Na_2SO_4 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.

5. Pengujian Inhibitor dalam Menghambat Pertumbuhan Kristal CaSO_4

Tahapan untuk menguji pengujian limbah cair tempe sebagai inhibitor dalam pengendapan kristal CaSO_4 dengan metode *seeded experiment* dilakukan dengan rangkaian percobaan sebagai berikut:

a. Penentuan Laju Pertumbuhan CaSO_4 Tanpa Penambahan Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dari larutan 0,1 M CaCl_2 anhidrat dan larutan 0,1 M Na_2SO_4 masing-masing dengan volume total akuades 300 mL. Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 90 °C untuk menghomogenkan larutan. Kemudian larutan CaCl_2 anhidrat 0,1 M dan larutan Na_2SO_4 0,1 M dicampurkan dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 90 °C agar terbentuk kerak CaSO_4 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan CaSO_4 yang terbentuk dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik yang sudah berisi 0,2 gram bibit kristal masing-masing sebanyak 50 mL. Setelah itu diletakkan dalam *water bath* pada suhu 90 °C selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dilakukan selama 60 menit, pada waktu 20 menit pertama satu gelas diambil, selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3–4 jam. Kemudian gelas diambil lagi setiap 10 menit sekali hingga pada gelas

yang terakhir. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2SO_4 sebesar 0,15 dan 0,2 M.

b. Penentuan Laju Pertumbuhan CaSO_4 dengan Penambahan Inhibitor pada Konsentrasi Larutan Pertumbuhan yang Berbeda dengan Metode *Seeded Experiment*

Larutan pertumbuhan dibuat dari larutan 0,1 M CaCl_2 anhidrat dan larutan 0,1 M Na_2SO_4 masing-masing dengan volume total 300 mL limbah cair tempe 5%.

Masing-masing larutan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 90 °C untuk menghomogenkan larutan. Kemudian larutan CaCl_2 anhidrat 0,1 M dan larutan Na_2SO_4 0,1 M dicampurkan dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 15 menit dengan suhu 90 °C agar terbentuk kerak CaSO_4 dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter.

Larutan CaSO_4 yang terbentuk dimasukkan ke dalam 5 gelas plastik yang sudah berisi 0,2 gram bibit kristal masing-masing sebanyak 50 mL. Setelah itu diletakkan dalam *water bath* pada suhu 90 °C selama 15 menit untuk mencapai kesetimbangan. Pengamatan dilakukan selama 60 menit, pada waktu 20 menit pertama satu gelas diambil, selanjutnya disaring menggunakan kertas saring yang sudah ditimbang, lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 3-4 jam. Kemudian gelas diambil lagi setiap 10 menit sekali hingga pada gelas yang terakhir. Percobaan ini diulang dengan variasi konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2SO_4 sebesar 0,15 dan 0,2 M serta variasi konsentrasi inhibitor 15, 25, 35, dan 45%.

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 CaSO_4 sebelum atau sesudah penambahan inhibitor dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Perubahan ukuran partikel dari kelimpahan CaSO_4 pada masing-masing endapan dari setiap percobaan yang dilakukan juga dianalisis dengan *Particle Size Analyzer* (PSA). Struktur kristal CaSO_4 sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dianalisis dengan *X-ray Diffactogram* (XRD).

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 sulfat (CaSO_4).
2. Kemampuan inhibitor limbah cair tempe dalam menghambat pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) yang paling efektif pada larutan pertumbuhan dengan konsentrasi 0,15 M dan pada konsentrasi inhibitor 45% dengan nilai persentase efektivitas sebesar 89,76%.
3. Analisis morfologi kerak CaSO_4 menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan perubahan morfologi kristal tanpa penambahan dan dengan penambahan inhibitor. Tanpa penambahan inhibitor kristal CaSO_4 berbentuk panjang dan berukuran besar, sedangkan dengan penambahan inhibitor kristal CaSO_4 berbentuk pendek dan berukuran kecil.
4. Analisis struktur kristal menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) menunjukkan perbedaan puncak difraktogram 2θ . Tanpa penambahan inhibitor menunjukkan

fasa gipsum dan basanit, sedangkan dengan penambahan inhibitor menunjukkan fasa gipsum, basanit, dan anhidrit.

5. Analisis distribusi partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA)

menunjukkan bahwa tanpa penambahan inhibitor memiliki nilai *mean* sebesar 20,82 μm , sedangkan dengan penambahan inhibitor memiliki nilai *mean* sebesar 9,571 μm .

B. Saran

Untuk meningkatkan mutu penelitian yang telah dilakukan, maka penulis memberikan saran yaitu perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terhadap penghambatan kerak CaSO_4 dengan menambah variasi konsentrasi larutan pertumbuhan dengan metode yang sama. Selain itu, perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut tentang limbah cair tempe sebagai inhibitor.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, M. 1997. *Teknik Kromatografi Untuk Analisis Bahan Makanan*. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Al-Barrak, K. and Rowell, D. L. 2006. The Solubility of Gypsum in Calcareous Soil. *Science Direct*. 136: 830–37.
- Al-Deffeeri, N. S. 2006. Heat Transfer Measurement As A Criterion for Performance Evaluation of Scale Inhibition in MSF Plants in Kuwait. *Desalination*. 204: 423–436.
- Al-Sofi, M. A. K., Hamada, T., Tanaka, Y., Al-Sulami, S. A. 1994. Laboratory Testing of Antiscalant Threshold Effectiveness. *The Second Gulf Water Conference, Bahrain*. 1: 66.
- Amjad, Z. 1987. Kinetics of Crystal Growth of Calcium Sulfate Dihydrate, the Influence of Polymer Composition, Molecular Weight, and Solution pH. *Journal of Chemistry*. 66: 1529-1536.
- Amjad, Z. 1995. Kinetics of Crystal Growth of Calcium Sulfate Dihydrate, the Influence of Polymer Composition, Molecular Weight, and Solution PH. *Can. J. Chem*. 66.
- Ang, H., Muryanto, S., and Hoang, T. 2006. *Gypsum Scale Formation Control in Pipe Flow System : A Systemic Study on the Effect of Process Parameters and Additives*. Curtin University Of Technology. In Perth.
- Anonim. 2008. *Spektrofotometer Infra Merah*.
<https://tomod4chi.wordpress.com/2008/06/08/spektrofotometer-infra-merah/>.
Diakses pada tanggal 10 Agustus 2020.

- Anonim. 2020. [eprints.poltekkesjogja.ac.id/4136/2/BAB II.doc](http://eprints.poltekkesjogja.ac.id/4136/2/BAB%20II.doc). Diakses pada tanggal 10 Agustus 2020.
- Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., and Leslie, G. 2011. Scale Formation and Control in High Pressure Membrane Water Treatment Systems : A Review. *Journal of Membrane Science*. 383: 1–16.
- Asnawati. 2001. Pengaruh Temperatur Terhadap Reaksi Fosfonat dalam Inhibitor Kerak Pada Sumur Minyak. *Jurnal Ilmu Dasar*. 2: 1–20.
- Azimi, G. and Papangelakis, V. G. 2011. Mechanism and Kinetics of Gypsum Anhydrite Transformation in Aqueous Electrolyte Solutions. *Hydrometallurgy*. 108: 122-129.
- Badr, A. and Yassin, M. A. A. 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 Penataran Petani Dan Pedagang Pengumpul Gambir di Kecamatan Permasalahan Gambir di Sumatera Barat dan Alternatif Pemecahannya (Azmi Dhalimi) 59 Pangkalan Kab. 50 Kota 29-30 November 1991*. FMIPA Unand. Padang.
- Brown, G. 1978. *Unit Operation*. John Wiley and Sons Inc. Tokyo.
- Chauhan, K., Sharma, P., and Chauhan, G. S. 2015. Removal/Dissolution of Mineral Scale Deposits. *Mineral Scales and Deposits*. pp 701-720.
- Cowan, J. C. and Weintritt, D. J. 1976. *Water Formed Scale Deposit*. Houston. Gulf Publishing Co. Texas.
- Cullity, B. D. 1987. *Element of X-Ray Diffraction*. Publishing Company. Inc. New York.
- Dewi, F. T. dan Masduqi, A. 2003. Penyisihan Fosfat dengan Proses Kristalisasi Dalam Reaktor Terfluidasi Menggunakan Media Pasir Silika. *Jurnal Purifikasi*. 4: 151–56.

- Gabriel, B. 1985. *SEM: A User's Manual for Material Science*. American Society for Metal. pp 40.
- Gandjar, I. G. dan Rohman, A. 2007. *Kimia Farmasi Analisis*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Gill, J. S. 1999. A Novel Inhibitor for Scale Control in Water Desalination. *Desalination*. 124: 43–50.
- Halimatuddahlia. 2003. *Pencegahan Korosi dan Scale pada Proses Produksi Minyak Bumi*. Laporan Penelitian Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Hamed, O. A., Al-Sofi, M. A. K., Ghulam, M. M., Dalvi, A. G. 1997. *The Performance of Different Antiscalants in Multi-Stage Flash Distillers, Acquired Experience Symposium*. Al-Jubail. pp 1558–1574.
- Handayani, D., Ranova, R., Bobbi, H., Farlian, A. Almahdi, and Arneti. 2004. Pengujian Efek Anti Feedan dari Ekstrak dan Fraksi Daun Gambir (*Uncaria Gambir Roxb.*) Terhadap Hama Spedopteralitura Fab. (Lepidoptera; Noctuide). *Seminar Nasional Tumbuhan Tanaman Obat Indonesia XXVI*.
- Hasson, D. and Semiat, R. 2005. Scale Control In Saline and Waste Water Desalination. *Israel Journal of Chemistry*. 46: 97–104.
- Holysz, L., Szczes, A., and Chibowski, E. 2007. Effect of a Carboxylic Acids on Water and Electrolyte Solution. *Journal of Colloid and Interface Science*. 316: 65-1002.
- Hossaeen, A. 2000. *Particle Size Analyzer*. King Fahd Petroleum & Mineral. Arab Saudi.
- James P. M. and Syvitski. 1991. *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kazakevich, Y., dan Lobrutto, R. 2007. *HPLC for Pharmaceutical Scientist*. John Wiley dan Sons, Inc. New Jersey. pp 25 –192.
- Khopkar, S. M. 2001. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta.

- Khopkar, S.M. 2003. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta.
- Lestari, D. E. 2000. Penelusuran Unsur Pembentukan Kerak Pada Sistem Pendingin Sekunder Reaktor GA Siwabessy dengan Metode Analisis Aktivasi Neutron (AAN). *Prosiding Hasil Penelitian P2TRR dan P2TKN BATAN*. Serpong.
- Lestari, D. E., G. R. Sunaryo, Y. E. Yulianto, S. Alibasyah, dan S. B. Utomo. 2004. *Kimia Air Reaktor Riset G. A. Siwabessy*. Makalah Penelitian P2TRR dan P2TKN BATAN. Serpong.
- Lestari, D. E. 2008. *Kimia Air, Pelatihan Operasional, dan Supervisor Reaktor Riset*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Serpong.
- Mansyur, Dhalika, T., Hernaman, I., Budiman, A., Islami, R. Z., dan Wiyatna, M. F. 2015. Produksi Asam Laktat Dalam Fermentasi Anerob Limbah Air Kedelai dari Industri Tempe. *Seminar Nasional Fakultas Pertanian Unpad ke-2*. Universitas Padjajajaran.
- Menik, S. 2010. Karakterisasi Cangkang Kerang Menggunakan XRD dan X-Ray Physic Basic Unit. *Jurnal Neutrino*. 3(1): 32–34.
- Notohadiprawiro, T. 1999. *Tanah dan Lingkungan*. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Jakarta.
- Nurhasan dan Pramudyanto, B. B. 1991. *Penanganan Air Limbah Pabrik Tahu*. Yayasan Bina Karta Lestari (BINTARI). Semarang.
- Patel, S., and Finan, M. A. 1994. New Antifoulants for Deposit Control in MSF and MED Plants. *Desalination*. 124: 63 –74.
- Patton, C. 1981. *Oilfield Water System 2ed*. Cambeel Petroleum Series. Oklahoma. pp 49–79.
- Putra, E. D. L. 2004. *Kromatografi Cair Kinerja Tinggi dalam Bidang Farmasi*. Jurusan Farmasi Fakultas dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara. Medan.

- 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*. 1(1): 11.
- Rahmania, Y. 2012. Studi Pendahuluan Ekstrak Kulit Kakao (*Theobroma Cacao* L.) dan Nalco 72990 Sebagai Inhibitor Pembentuk Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Skripsi*. Univesritas Lampung.
- Ratna, P. S. 2011. Studi Penanggulangan Problem Scale dari Near-Wellbore Hingga Flowline di Lapangan Minyak Limau. *Skripsi*. Universitas Indonesia.
- Ratnani, R. D. 2011. Kecepatan Penyerapan Zat Organik Pada Limbah Cair Industri Tahu dengan Lumpur Aktif. *Jurnal Momentum UNWAHAS*. 7(2): 18–24.
- Ray, B. 2001. *Fundamental Food Microbiology 2nd Ed*. CRC Press. Boca Raton.
- Reddy G., Altaf M. D., Naveena B.J., and Venkateshwar M. 2008. Amylolytic Bacterial Lactic Acid Fermentation, A Review. *Biotechnology Advances*. 26: 22–34.
- Rini, H. dan Utami. 2016. Pengaruh Penggunaan Campuran Ekstrak Gambir dan Kemenyan Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Sulfat (CaSO_4). *Tesis*. Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
- Riyanto, H. 2006. *Pemanfaatan Limbah Air Rebusan Kedelai Untuk Pembuatan Nata de Soya (Kajian Penambahan Sukrosa dan Ekstrak Kecambah)*. University of Muhammadiyah Malang. Malang.
- Said, N. I. dan Herlambang, A. 2003. *Teknologi Pengolahan Limbah Tahu Tempe dengan Proses Biofilter Anaerob dan Aerob*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta.
- Said, I. N. 1999. *Teknologi Pengolahan Air Limbah Tahu-Tempe dengan Proses Biofilter Anaerob dan Aerob*. Direktorat Teknologi Lingkungan. Jakarta.
- Saito, T. 1996. *Buku Teks Kimia Anorganik Online*.

- http://opac.salatigakota.go.id/ucs/index.php?p=show_detail&id=30982.
- Salimin, Z., dan Gunandjar. 2007. Penggunaan EDTA Sebagai Pencegah Timbulnya Kerak Pada Evaporasi Limbah Radioaktif Cair. *Prosiding HALIPDIPTN*. Pustek Akselerator dan Proses Bahan-BATAN. Yogyakarta.
- Siswoyo dan Erna, K. 2005. *Identifikasi Pembentukan Scale*. UPN Veteran Yogyakarta. Yogyakarta.
- Sugiharto. 1994. *Dasar – Dasar Pengelolaan Air Limbah*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Suharso, Buhani, and Aprilia, L. 2014. Influence of Calix[4] Arene Derived Compound on Calcium Sulphate Scale Formation. *Asian Journal of Chemistry*. 26(18): 6155–6158.
- Suharso, Buhani, and Suhartati, T. 2009. The Role of C-Methyl-4,10,16,22 Tetramethoxy Calix[4] Arene as Inhibitor of Calcium Carbonate (CaCO_3) Scale Formation. *Indonesian Journal of Chemistry*. 9(2): 206–210.
- Suharso, Buhani, Bahri, S., dan Endaryanto, T. 2010. The Use of Gambier Extracts from West Sumatra as A Green Inhibitor of Calcium Sulfate (CaSO_4) Scale Formation. *Asian Journal of Research in Chemistry (AJRC)*. 3(1): 183–187.
- Suharso, Buhani, Suhartati, T., dan Aprilia, L. 2007. *Sintesis C- Metil-4,10,16,22 Tetrametoksi Kaliks[4]Arena dan Peranannya Sebagai Inhibitor Pembentukan Kerak Kalsium Karbonat (CaCO_3)*. Laporan Akhir Program Insentif. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suharso, Parkinson. G., and Ogden, M. 2008. Effect of Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) on the Growth Rate and Morphology of Borax Crystals. *Journal of Applied Sciences*. 7(10): 1390–1396.
- Suharso. 2004. Effect of Sodium Lauryl Sulphate (SLS) on Growth Rate and Morphology of Borax Crystals. *Jurnal Sains & Teknologi*. 10(3): 165–172.
- Suharso. 2005a. Characterization of Surface of the (010) Face of Borax Crystals Using Ex Situ Atomic Force Microscopy (AFM): Cleavage and Cleavage Steps. *Indonesian Journal of Chemistry*. 5(3): 274–277.

- Suharso. 2005b. Characterization of Surface of the (100) Face of Borax Crystals Using Atomic Force Microscopy (AFM): Dislocation Source Structure and Growth Hillocks. *Jurnal Sains & Teknologi*. 11(2): 105–110.
- Suharso. 2008. Mechanism of Borax Crystallization Using Conductivity Method. *Indonesian Journal of Chemistry*. 8(3): 327–330.
- Suharso. 2009a. Ex Situ Investigation of Surface Topography of Borax Crystals by AFM: Relation Between Growth Hillocks and Supersaturation Interpreted by Spiral Growth Theory. *Jurnal Matematika & Sains*. 11(4): 140–145.
- Suharso. 2009b. In Situ Measurement of the Growth Rate of the (111) Face of Borax Single Crystal. *Jurnal Matematika & Sains*. 10(3): 101–106.
- Suharso. 2010a. Growth of the (001) Face of Borax Crystals. *Indonesian Journal of Chemistry*. 5(2): 98–100.
- Suharso. 2010b. Growth Rate Distribution of Borax Single Crystals on the (001) Face Under Various Flow Rates. *Indonesian Journal of Chemistry*. 6(1): 16–19.
- 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, Utari, H. R., Tugiyono, and Satria, H. 2019. Influence of Gambier Extract Modification as Inhibitor of Calcium Sulfate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 22–28.
- Suharso, Setiososari, E., Kiswandono, A. A., Buhani, and Satria, H. 2019. Liquid Smoke of Coconut Shell As Green Inhibitor of Calcium Carbonate Scale Formation. *Desalination and Water Treatment*. 169: 29–37.

- 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.
- Supratman, U. 2010. *Ekiulibrium Penentuan Senyawa Organik*. Padjajaran. Bandung.
- 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.
- Syahrurachman, A. 1994. *Mikrobiologi Kedokteran Edisi Revisi*. Bima Rupa Aksara. Jakarta.
- Totoki S., Wada Y., Moriya N., and Shimaoka H. 2007. DEP Active Grating Method: A New Approach for Size Analysis of Nano-Sized Particles. *Shimadzu Review*. 62: 173–79.
- Vendamawan, B. 2016. *Pembentukan Kerak CaCO_3 - CaSO_4 dengan Konsentrasi Ca^{2+} 2000 Ppm Pada Suhu 30 °C dan 40 °C dalam Pipa Beraliran Laminar*. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang.
- Wafiroh, S. 1995. *Pemurnian Garam Rakyat Dengan Kristalisasi Bertingkat*. Laporan Penelitian. Universitas Airlangga. Surabaya.
- Webb, P. A. 2006. Interpretation of Particle Size Reported By Different Analytical Techniques. *Micromeritics Instrument Corporation*. 67(9): 548-550
- Weijnen, M. P. C., W. G. J. Marchee, and G. M. V. Rosmalen. 1983. A Quantification of the Effectiveness of an Inhibitor on the Growth Process of a Scalant. *Desalination*. 47: 81–92.
- Wignyanto, Hidayat, N., dan Ariningrum, A. 2009. Bioremediasi Limbah Cair Sentra Industri Tempe Sanan Serta Perencanaan Unit Pengolahannya (Kajian Pengaturan Kecepatan Aerasi dan Waktu Inkubasi). *Jurnal Teknologi Pertanian*. 10(2): 123–135.

Wiryani, E. 2020. *Analisis Kandungan Limbah Cair Pabrik Tempe*. Jurusan Biologi, FMIPA Undip. Semarang

Zeihner, E. H. K., Bosco, H., and Williams, K. D. 2003. Novel Antiscalant Dosing Control. *Desalination*. 157: 19–27.