

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN DAN
RASIO MOLAR FOSFAT DAN AMONIUM
TERHADAP EFISIENSI PENURUNAN
MAGNESIUM DAN
MASSA PUPUK STRUVITE DARI BITTERN
MENGUNAKAN FLUIDIZED BED REACTOR**

SKRIPSI



Oleh :

MOHAMMAD BINTANG WIBOWO

NPM 22034010107

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA**

2026

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN DAN
RASIO MOLAR FOSFAT DAN AMONIUM TERHADAP
EFISIENSI PENURUNAN MAGNESIUM DAN
MASSA PUPUK STRUVITE DARI BITTERN
MENGUNAKAN FLUIDIZED BED REACTOR**

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Dalam Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T.)
Program Studi Teknik Lingkungan.**

Diajukan Oleh :

MOHAMMAD BINTANG WIBOWO
NPM 22034010107

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA**

2026

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN DAN RASIO MOLAR FOSFAT DAN AMONIUM TERHADAP EFISIENSI PENURUNAN MAGNESIUM DAN MASSA PUPUK STRUVITE DARI BITTERN MENGUNAKAN FLUIDIZED BED REACTOR

Disusun Oleh:



MOHAMMAD BINTANG WIBOWO

NPM. 22034010107

Telah disetujui untuk mengikuti Ujian Penelitian

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Muhammad Abdus Salam Jawwad, S.T., M.Sc.

NIP. 19940727 202406 1001

Mengetahui,

**Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur**



Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P.

NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN DAN
RASIO MOLAR FOSFAT DAN AMONIUM TERHADAP
EFISIENSI PENURUNAN MAGNESIUM DAN
MASSA PUPUK STRUVITE DARI BITTERN
MENGUNAKAN FLUIDIZED BED REACTOR

Disusun Oleh:

Mohammad Bintang Wibowo

NPM 22034010107

Telah diuji kebenaran oleh Tim Penguji dan diterbitkan pada Jurnal Academia
Open (Terakreditasi Sinta 3)

Menyetujui,

TIM PENGUJI

1. Ketua

Pembimbing

Muhammad Abdus Salam Jawwad, S.T., M.Sc.
NIP/NPT. 19940727 202406 1001

Restu Hikmah Ayu Murti, S.ST., M.Sc.
NIP/NPT. 19930416 202506 2005

2. Anggota

Syadzadhiya Q. Z. Nisa, S.T., M.T.
NIP/NPT. 21219940930296

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur

Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P.
NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR REVISI

ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN DAN RASIO MOLAR FOSFAT DAN AMONIUM TERHADAP EFISIENSI PENURUNAN MAGNESIUM DAN MASSA PUPUK STRUVITE DARI BITTERN MENGUNAKAN FLUIDIZED BED REACTOR

Disusun Oleh:


Mohammad Bintang Wibowo
NPM 22034010107

Telah direvisi dan disahkan pada tanggal 28 Agustus 2026

TIM PENILAI

KETUA

ANGGOTA


Restu Hikmah Ayu Murti, S.ST., M.Sc.
NIP/NPT. 19930416 202506 2005


Syadzadhiya O. Z. Nisa, S.T., M.T.
NIP. 21219940930296

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Mohammad Bintang Wibowo
NPM : 22034010107
Program : Sarjana (S1)
Program Studi : Teknik Lingkungan
Fakultas : Teknik dan Sains

Menyatakan bahwa dokumen skripsi ini sepenuhnya bebas dari materi karya ilmiah yang pernah diajukan untuk meraih gelar akademik di institusi mana pun. Tidak ada karya atau pendapat pihak lain yang diklaim sebagai milik saya, semua rujukan telah disitasi dengan benar sesuai kaidah penulisan ilmiah dan tercantum pada daftar pustaka.

Dengan demikian, saya menjamin orisinalitas karya ini dan sepenuhnya bebas dari tindakan plagiat. Jika di kemudian hari ditemukan bukti yang bertentangan dengan pernyataan ini, saya siap menerima sanksi akademik maupun hukum yang berlaku.

Surat pernyataan ini disusun secara jujur dan tanpa paksaan dari siapa pun, untuk digunakan sesuai dengan keperluannya.

Surabaya, 27 Agustus 2026

Yang Membuat Pernyataan



Mohammad Bintang Wibowo

22034010107

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini sebagai hasil akhir dari seluruh pembelajaran di Teknik Lingkungan dengan judul **Analisis Pengaruh Laju Aliran dan Rasio Molar Fosfat dan Ammonium terhadap Efisiensi Penurunan Magnesium dan Massa Pupuk *Struvite* dari *Bittern* Menggunakan Fluidized Bed Reactor**. Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak - pihak yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir diantaranya:

1. Prof. Dr. Dra. Jariyah., M.P., selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
2. Firra Rosariawari, S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
3. Muhammad Abdus Salam Jawwad, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Tugas Akhir yang telah menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbingan serta arahan bagi penulis.
4. Orang tua penulis yang selalu memberikan semangat, kasih sayang, nasihat, serta dukungan baik bentuk moril maupun materi dan doa.
5. Teman-teman Teknik Lingkungan Angkatan 2022 yang senantiasa membantu dan memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan laporan ini.

Dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, tentunya masih terdapat kekurangan yang disebabkan oleh keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran dari para pembaca agar dapat belajar lebih baik di masa depan. Laporan ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi penulis, masyarakat luas, dan juga institusi,

Surabaya, 13 Maret 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat.....	4
1.5 Lingkup Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tinjauan Umum.....	6
2.1.1 Industri Garam.....	6
2.1.2 Limbah Garam (<i>Bittern</i>)	7
2.1.3 <i>Resource Recovery</i>	8
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Kristal <i>Struvite</i>	10
2.2.1.2 Kristalisasi	10
2.2.1.2 Nukleisasi	11

2.2.1.3	Supersaturasi.....	11
2.2.1.4	<i>Struvite</i>	13
2.2.1.5	Reaksi Kimia Pembentukan Kristal <i>Struvite</i>	15
2.2.1.6	Faktor Pengganggu dari Bitttern	16
2.2.1.7	Kinetika Reaksi dan <i>Solubility Product</i> (Ksp).....	18
2.2.2	<i>Fluidized Bed Reactor</i>	18
2.2.2.1	Definisi <i>Fluidized Bed Reactor</i>	18
2.2.2.2	Desain dan Hidrodinamika Reaktor <i>Fluidized Bed</i> untuk Kristalisasi <i>Struvite</i>	20
2.2.2.3	<i>Minimum Fluidization Velocity</i> (Umf).....	21
2.2.3	<i>Seed Material</i>	23
2.2.3.1	Pasir Silika.....	24
2.2.4	Pengaruh Laju Aliran dalam Pembentukan Kristal <i>Struvite</i>	25
2.2.5	Rasio Molar	27
2.2.5.1	Magnesium	27
2.2.5.2	Fosfat	27
2.2.5.3	Ammonium.....	27
2.2.5.4	Pengaruh Rasio Molar Terhadap Pembentukan Kristal <i>Struvite</i> ..	28
2.2.6	Efisiensi Penurunan Magnesium	29
2.3	Hasil Penelitian Sebelumnya.....	30
BAB 3 METODE PENELITIAN		32
3.1	Kerangka Penelitian	32
3.2	Bahan dan Alat	33
3.2.1	Bahan	33
3.2.2	Alat	33

3.2.3	Desain Reaktor Fluidized Bed.....	34
3.3	Cara Kerja	34
3.3.1	Persiapan Sampel.....	34
3.3.2	Pengambilan Air Limbah <i>Bittern</i>	35
3.3.2	Pengujian Kadar Magnesium Pada Air Limbah	35
3.3.3	Perhitungan Nilai Rasio molar	36
3.3.4	Preparasi <i>Seed Material</i>	36
3.3.5	Pengujian Pada Fluidized Bed Reactor (FBR)	37
3.3.6	Pengujian Variasi Laju Aliran.....	38
3.3.7	Pengujian Variasi Rasio Molar	39
3.3.8	Pengambilan Sampel	40
3.3.9	Pemanenan Kristal <i>Struvite</i>	40
3.3.10	Pengujian Kadar Magnesium setelah Pengolahan Air Limbah	40
3.3.11	Analisis Data	41
3.4	Variabel.....	41
3.4.1	Variabel Bebas	41
3.4.2	Variabel Terikat.....	42
3.4.3	Variabel Kontrol	42
3.5	Analisis.....	42
3.5.1	Analisis Data	42
3.5.2	Analisis Removal Magnesium.....	42
3.5.3	Analisis Gravimetri	43
3.5.4	Analisis SEM-EDX	43
3.5.5	Analisis XRD.....	43
3.5.6	Analisis Statistik.....	44

3.6	Jadwal Kegiatan	44
3.7	Rancangan Anggaran Biaya (RAB) Penelitian	45
3.8	Matriks Penelitian	46
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Hasil	49
4.1.2	Karakteristik Awal Air Limbah <i>Bittern</i>	49
4.1.3	Matriks Penelitian.....	50
4.2	Pembahasan	54
4.2.1	Kinerja Reaktor Fluidized Bed dalam Menurunkan Konsentrasi Magnesium pada <i>Bittern</i>	54
4.2.2	Pengaruh Variasi Laju Aliran Terhadap Efisiensi Penurunan Magnesium dan Massa Kristal <i>Struvite</i> yang Terbentuk pada Pengolahan <i>Bittern</i>	56
4.2.2.1	Laju Aliran 3 L/menit	57
4.2.2.2	Laju Aliran 3,5 L/menit	58
4.2.2.3	Laju Aliran 4 L/menit	60
4.2.2.4	Laju Aliran 4,5 L/menit	61
4.2.2.5	Laju Aliran 5 L/menit	62
4.2.3	Pengaruh Variasi Rasio Molar Fosfat dan Amonium Terhadap Efisiensi Penurunan Magnesium serta Massa Kristal <i>Struvite</i>	65
4.2.3.1	Rasio Molar 1:1:1	66
4.2.3.2	Rasio Molar 1:1,3:1	67
4.2.3.3	Rasio Molar 1:1:1,5	68
4.2.3.4	Analisis Regresi Terhadap Efisiensi Penurunan Magnesium	69
4.2.3.5	Analisis Regresi Terhadap Perolehan Massa Kristal	70

4.2.4 Karakteristik Kristal <i>Struvite</i> yang Terbentuk dari Pengolahan <i>Bittern</i> , melalui Analisis XRD dan SEM-EDX	72
4.2.4.1 Analisis XRD.....	72
4.2.4.2 Rasio Molar 1:1:1	74
4.2.4.3 Rasio Molar 1:1,3:1	75
4.2.4.4 Rasio Molar 1:1:1,5	76
4.2.4.5 Analisis SEM-EDX	78
4.2.4.6 Rasio 1:1:1	80
4.2.4.7 Rasio 1:1,3:1	82
4.2.4.8 Rasio 1:1:1,5	83
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA.....	xii

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Hasil Penelitian Terdahulu	30
Tabel 3. 1 Metode Analisis Data	42
Tabel 3. 2 Jadwal Kegiatan	44
Tabel 3. 3 Total RAB Penelitian.....	45
Tabel 3. 4 Matriks Penelitian	46
Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Limbah Bittern	49
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Pengaruh Rasio Molar dan Laju Aliran.....	50
Tabel 4.3 Persen Removal Magnesium	52
Tabel 4.4 Hasil Kristal Struvite	53
Tabel 4.5 Analisis EDX.....	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Limbah <i>Bittern</i>	8
Gambar 2. 2 Zona Kristalisasi.....	12
Gambar 2. 3 Kristal <i>Struvite</i>	14
Gambar 2. 4 Interaksi antara NH_4^+ , PO_4^{3-} , dan Mg^{2+}	15
Gambar 2. 5 Fluidized Bed Reactor.....	19
Gambar 2. 6 Desain FBR	20
Gambar 2. 7 <i>Seed Material</i>	24
Gambar 2. 8 Pasir Silika.....	25
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	33
Gambar 3. 2 Desain Reaktor Fluidized Bed.....	34
Gambar 4.1 Reaktor Fluidized Bed Reactor	54
Gambar 4.2 Grafik Kadar Magnesium.....	55
Gambar 4.3 Grafik Laju Aliran	56
Gambar 4.4 Penyemenan Pasir Silika	57
Gambar 4. 5 Pembentukan Amorf.....	58
Gambar 4.6 Fluidasi Aliran	60
Gambar 4. 7 Fluidasi Aliran	61
Gambar 4.8 Grafik Kadar Magnesium (A) dan Massa Kristal <i>Struvite</i> (B)	66
Gambar 4.9 Uji Regresi Linier Berganda	69
Gambar 4.10 Uji Regresi Linier Berganda	70
Gambar 4. 11 Spektrum Standar XRD <i>Struvite</i> Murni (JCPDS No. 15-0762).....	73
Gambar 4.12 Grafik X-Ray Diffraction	73
Gambar 4.13 XRD Standard <i>Struvite</i> (A) & XRD 1:1:1 (B).....	74
Gambar 4.14 XRD Standard <i>Struvite</i> (A) & XRD 1:1,3:1 (B).....	75
Gambar 4.15 XRD Standard <i>Struvite</i> (A) & XRD 1:1:1,5 (B).....	76
Gambar 4.16 Kristal <i>Struvite</i> (A) & SEM 1:1:1 (B).....	80
Gambar 4.17 Kristal <i>Struvite</i> & SEM 1:1,3:1	82
Gambar 4.18 Kristal <i>Struvite</i> (A) & SEM 1:1:1,5 (B).....	83

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A.....	
LAMPIRAN B.....	
LAMPIRAN C.....	
LAMPIRAN D.....	

ABSTRAK

Industri garam di Indonesia menghasilkan volume limbah cair (bittern) dengan kadar magnesium sangat tinggi yang berpotensi mencemari lingkungan pesisir, namun sekaligus dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya sekunder melalui proses *resource recovery* menjadi pupuk *slow release* berupa kristal struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *Fluidized Bed Reactor* (FBR) dalam menurunkan konsentrasi magnesium pada limbah bittern, serta menganalisis pengaruh variasi laju aliran dan rasio molar reaktan terhadap efisiensi presipitasi dan karakteristik produk kristal yang dihasilkan. Eksperimen dilakukan secara berkesinambungan di dalam FBR menggunakan limbah bittern dari tambak garam di Blitar (konsentrasi awal magnesium 45.720 mg/L) dengan memvariasikan laju aliran fluida pada 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; dan 5,0 L/menit, serta rasio molar ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) pada 1:1:1; 1:1,3:1; dan 1:1:1,5. Kinerja reaktor dievaluasi melalui persentase penurunan konsentrasi magnesium di fasa cair dan pengukuran massa fisik kristal secara gravimetri, dilanjutkan dengan karakterisasi fasa kristalin, morfologi, dan komposisi unsur presipitat menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX). Hasil pengujian menunjukkan bahwa FBR mampu mencapai efisiensi *removal* magnesium sebesar 74,5% hingga 81,2%, dengan performa hidrodinamika terbaik dicapai pada laju aliran 4,5 L/menit. Pada parameter komposisi reaktan, perlakuan rasio amonium berlebih (1:1,3:1) memberikan hasil paling optimum dengan perolehan massa kristal tertinggi sebesar 35 gram. Hasil karakterisasi XRD dan SEM-EDX lebih lanjut memvalidasi bahwa rasio 1:1,3:1 sukses menghasilkan produk presipitat dengan tingkat kristalinitas tinggi, terdistribusi secara individual tanpa aglomerasi amorf, serta menampilkan morfologi batangan prisma memanjang (*rod-like*) khas struvite murni.

Kata Kunci: Bittern, *Fluidized Bed Reactor*, Magnesium, Rasio Molar, Struvite.

ABSTRACT

The salt industry in Indonesia generates a large volume of liquid waste (bittern) with a very high magnesium content that has the potential to pollute coastal environments, but simultaneously can be utilized as a secondary resource through a resource recovery process into a slow-release fertilizer in the form of struvite crystals ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). This study aims to evaluate the performance of a Fluidized Bed Reactor (FBR) in reducing the magnesium concentration in bittern, as well as to analyze the effects of varying flow rates and reactant molar ratios on the precipitation efficiency and the characteristics of the resulting crystal product. Continuous experiments were conducted in the FBR using bittern waste from salt ponds in Blitar (initial magnesium concentration of 45,720 mg/L) by varying the fluid flow rates at 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, and 5.0 L/min, and the molar ratios of ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) at 1:1:1, 1:1.3:1, and 1:1:1.5. Reactor performance was evaluated through the percentage of magnesium concentration reduction in the liquid phase and the gravimetric measurement of physical crystal mass, followed by the characterization of the crystalline phase, morphology, and elemental composition of the precipitate using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) instruments. The test results demonstrated that the FBR could achieve a magnesium removal efficiency of 74.5% to 81.2%, with the best hydrodynamic performance attained at a flow rate of 4.5 L/min. Regarding the reactant composition parameters, the excess ammonium ratio treatment (1:1.3:1) provided the most optimal results, yielding the highest crystal mass of 35 grams. Furthermore, the XRD and SEM-EDX characterization results validated that the 1:1.3:1 ratio successfully produced a precipitate product with high crystallinity, distributed individually without amorphous agglomeration, and displaying the elongated prismatic (rod-like) morphology typical of pure struvite.

Keywords: Bittern, Fluidized Bed Reactor, Magnesium, Molar Ratio, Struvite.