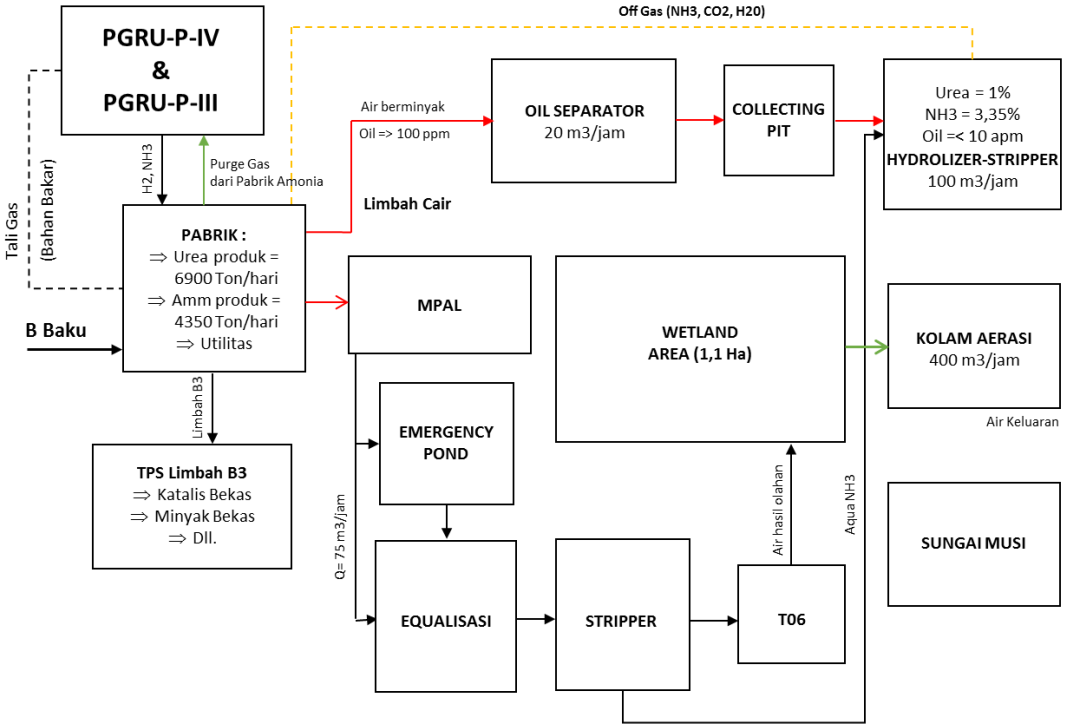
BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Gambaran Umum Pengelolaan Limbah

PT Pupuk Sriwidjaja Palembang menghasilkan limbah cair sebagai produk samping dari proses produksi pupuk urea. Dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan, perusahaan telah mengimplementasikan sistem pengolahan limbah cair yang komprehensif melalui beberapa unit Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Sistem pengolahan ini dirancang untuk memenuhi standar baku mutu limbah cair yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 122 Tahun 2004 dan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan No. 18 Tahun 2012.

Strategi pengelolaan limbah di PT Pusri menerapkan pendekatan bertingkat yang mengkombinasikan metode pengolahan fisika dan kimia. Pendekatan ini disesuaikan dengan karakteristik limbah, dimana limbah dengan konsentrasi tinggi dan konsentrasi rendah mendapat perlakuan yang berbeda untuk mengoptimalkan efisiensi pengolahan.



Gambar 12 *Flowchart* pengelolaan limbah

4.1.2 Pengelolaan Limbah Cair Konsentrasi Tinggi

Limbah cair berkonsentrasi tinggi berasal dari tumpahan pompa ammonia di unit produksi PUSRI II, PUSRI III, PUSRI IV, dan PUSRI IB. Sistem pengolahan limbah konsentrasi tinggi menggunakan rangkaian proses sebagai berikut:

a) ***Oil Separator*.** Tahap awal pengolahan dimulai dengan pemisahan minyak menggunakan *Oil Separator* untuk limbah yang mengandung minyak ≥ 100 ppm. Unit ini beroperasi dengan debit 20 m³/jam dan berfungsi memisahkan fraksi minyak dari limbah cair.

Gambar 13 *Oil separator*

b) ***Collecting Pit*.** Setelah melewati Oil Separator, limbah dialirkan ke *Collecting Pit* yang merupakan bak penampung tertutup berukuran 2×3×2,5 meter. Setiap unit produksi memiliki satu *Collecting Pit* yang dilengkapi dua pompa untuk mengalirkan limbah ke Buffer Tank dengan debit 40 m³/jam (PUSRI II) dan 30 m³/jam (PUSRI III dan IV).

Gambar 14 *Collecting pit*

c) ***Buffer Tank dan Hydrolizer*** Buffer Tank beroperasi pada temperatur maksimal 40°C dan dilengkapi sistem kontrol level otomatis serta penutup untuk mencegah penguapan gas ammonia. Limbah dari *Buffer Tank* selanjutnya diolah di unit *Hydrolizer* yang menghasilkan *off gas* sebagai bahan baku ammonia dan *treated water* dengan kandungan urea dan ammonia<5 ppm.

Gambar 15 *Oil separator*

4.1.3 Pengelolaan Limbah Cair Konsentrasi Rendah

Limbah cair konsentrasi rendah berasal dari tumpahan urea di *dissolving tank* dan *prilling tower*. Pengolahan limbah jenis ini menggunakan lima tahapan utama:

a) **Minimasi dan Pemisahan Air Limbah (MPAL).** Sistem kanal terbuka yang saling terhubung mengalirkan limbah menuju IPAL. Sebelum masuk sistem IPAL, limbah diberi perlakuan koagulan alum untuk mengendapkan padatan terlarut. Namun, dosis efektif pemberian alum belum teroptimasi dan terdapat risiko kontaminasi air hujan akibat sistem kanal terbuka.

Gambar 16 *MPAL*

b) ***Emergency Pond***. Kolam tertutup bervolume 1.000 m³ (20×20×3 meter) yang menampung limbah berkonsentrasi tinggi (NH_3 >500 ppm dan urea >1.500 ppm). Kolam ini dilengkapi *blower* untuk menarik gas yang timbul menuju *scrubber* dan beroperasi dengan waktu retensi 15 hari untuk mencegah *shock loading* pada sistem IPAL.

Gambar 17 *Emergency pound*

c) **Kolam Ekualisasi.** Kolam berukuran 30×20×2,5 meter yang berfungsi meredam fluktuasi kuantitas dan kualitas limbah. Limbah sebanyak 400 m³/jam dinetralkan dengan asam sulfat, sementara 100 m³/jam dialirkan ke kolom *stripper* setelah dibersihkan dari *suspended solid* menggunakan koagulan alum dan saringan pasir.

Gambar 18 *Kolam Ekualisasi*

d) ***Wetland*.** Unit pengolahan menggunakan eceng gondok seluas 1,1 Ha dengan kedalaman 1,5 meter. Eceng gondok merupakan salah satu *biological treatment*

di sistem pengelolaan limbah berfungsi menyerap ammonia sebagai nutrien dan mereduksi logam berat. Penyerapan langsung oleh akar Enceng gondok menyerap amonia (NH_3) dan ion amonium (NH_4^+) langsung dari air melalui sistem akarnya yang berkembang baik. Akar-akar halus dengan luas permukaan yang besar memungkinkan penyerapan yang efisien. Area di sekitar akar (rhizosfera) menjadi zona aktif dimana bakteri nitrifikasi seperti Nitrosomonas dan Nitrobacter mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan kemudian nitrat. Oksigen yang dilepaskan oleh akar mendukung proses ini. Amonia yang diserap dikonversi menjadi asam amino dan protein untuk pertumbuhan tanaman. Enceng gondok menggunakan nitrogen untuk sintesis klorofil, enzim, dan biomassa lainnya. Meskipun metode ini ekonomis dan hemat energi, penggunaannya telah dihentikan karena kurang mampu mengolah limbah dalam volume besar.

Gambar 19 *Wetland*

e) ***Aerasi Pond.*** Sistem biologis menggunakan bakteri untuk menurunkan BOD, COD, TSS, dan ammonia. Terdiri dari 6 kolam berukuran 25×100 meter, dimana 3 kolam dilengkapi aerator untuk suplai oksigen. Saat ini hanya sebagian kolam yang beroperasi karena fungsi biologisnya telah digantikan oleh sistem stripper yang lebih efektif.

Gambar 20 *Aerasi pond*

4.1.4 Kolam Limbah sebagai Unit Pengolahan Akhir

Setelah melalui seluruh rangkaian proses pengolahan yang telah diuraikan, limbah cair dari semua unit akan dialirkan menuju kolam limbah sebagai unit pengolahan terakhir sebelum dibuang ke Sungai Musi melalui *outlet*. Kolam limbah memiliki volume 6.445 m³ dengan perhitungan sebagai berikut :

Perhitungan volume kolam limbah :

Dimensi Bak Pengendap 1 dan Bak Pengendap 2 :

Panjang = 31 meter

Lebar = 21 meter

Dimensi Bak Pengendap 3 dan Bak Pengendap 4

Panjang = 40 meter

Lebar = 21 meter

Dimensi Bak Pengendap 5 dan Bak Pengendap 6

Panjang = 28 meter

Lebar = 21 meter

Tinggi dari dasar ke permukaan air = 3,1 meter

Volume Bak Pengendap 1 dan Bak Pengendap 2 (Panjang x Lebar x Tinggi)

= 31 x 21 x 3,1

= 2018,1 m3

Volume Bak Pengendap 3 dan Bak Pengendap 4 (Panjang x Lebar x Tinggi)

= 40 x 21 x 3,1

= 2604 m3

Volume Bak Pengendap 5 dan Bak Pengendap 6 (Panjang x Lebar x Tinggi)

= 28 x 21 x 3,1

= 1822,8 m3

Total

= 2018,1 + 2604 + 1822,8

= 6444,9 ≈ 6.445 m^3

Gambar 21 Kolam limbah

Kolam limbah juga terbagi menjadi 6 segment yang disebut Bak Pengendap dan berfungsi sebagai final polishing untuk memastikan kualitas *effluent* memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Di kolam limbah inilah dilakukan penambahan aluminium sulfat sebagai langkah treatment akhir untuk menurunkan pH dan kandungan ammonia sebelum pembuangan ke badan air. Lokasi ini menjadi titik kritis dalam pengendalian kualitas limbah karena merupakan tahap terakhir sebelum limbah keluar dari sistem pengolahan PT Pusri.

4.1.5 Praktik Penggunaan Alumunium Sulfat *Existing*

Berdasarkan hasil wawancara dengan tim pengendalian pencemaran PT Pupuk Sriwidjaja Palembang, diperoleh informasi mengenai praktik penggunaan aluminium sulfat sebagai berikut :

a) Kondisi Pemicu Penggunaan Aluminium Sulfat

Penambahan aluminium sulfat dilakukan secara reaktif ketika terjadi kondisi offset limbah yang disebabkan oleh:

- Aktivitas pencucian *finishing* pada unit produksi.
- Proses pengosongan *line* ammonia.
- Kegiatan *shutdown* dan *start up* pabrik.

Kondisi *offset* ini ditandai dengan kenaikan nilai pH dan kandungan ammonia pada saluran air limbah serta di *inlet* kolam limbah, dimana pH normal berada pada rentang 7-10 dan ammonia di atas 200 ppm sesuai batasan ISO No. PSP-LHD-IK-001.

b) Prosedur Penanganan Kondisi Offset

Langkah-langkah yang dilakukan tim pengendalian pencemaran ketika terjadi kondisi *offset* meliputi:

- Melakukan pengecekan kandungan limbah dan identifikasi sumber pencemar.
- Berkoordinasi dengan tim operasi untuk mitigasi.
- Melakukan injeksi aluminium sulfat di kanal-kanal pabrik dan *inlet* kolam limbah.
- Melaporkan kondisi ke hierarki yang ditentukan.

c) Dosis dan Aplikasi Aluminium Sulfat

Praktik penggunaan aluminium sulfat saat ini dilakukan di dua lokasi dengan karakteristik yang berbeda:

- **Aplikasi di Kanal Pabrik:**
  - ✓ Dosis yang digunakan berkisar 2-5 karung aluminium sulfat per sekali injeksi.
  - ✓ Aplikasi bersifat reaktif saat terjadi kondisi *offset* limbah.
  - ✓ Jumlah yang diinjeksikan tergantung pada konsentrasi limbah dan luasan kanal.
- **Aplikasi di Kolam Limbah:**
  - ✓ Data historis *turn around* pabrik PUSRI 1B menunjukkan penggunaan 38 karung untuk 5 kali aplikasi (3 kali *shutdown* dan 2 kali *start up*).
  - ✓ Rata-rata 7,6 karung per sekali aplikasi di kolam limbah (*volume* 6.445 m^3).
- **Perhitungan Dosis di Kolam Limbah:**

  Dosis rata-rata = (7,6 karung × 50 kg/karung) ÷ 6.445 m^3
  = 380 kg ÷ 6.445 m^3
  = 58,9 mg/L
- **Kondisi Umum:**
  - ✓ Setiap karung aluminium sulfat memiliki berat 50 kg dengan harga Rp 350.000 per karung.
  - ✓ Belum tersedia *Standard Operating Procedure* (SOP) untuk *treatment* injeksi aluminium sulfat.

- ✓ Belum pernah dilakukan kajian untuk menentukan dosis optimum untuk kedua lokasi aplikasi.

Perbandingan aplikasi aluminium sulfat di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Perbandingan Aplikasi Aluminium Sulfat di PT Pusri

Parameter	Aplikasi di Kanal	Aplikasi di Kolam Limbah
Dosis (karung)	2 – 5	7,6 (rata-rata)
Dosis (kg)	100 – 250	380
Dosis (mg/L)	Tidak terukur*	58,9
Frekuensi	Reaktif (saat *offset*)	*Turn around* (5x/periode)
Tujuan	Mengatasi *offset* kanal	Treatment kolam limbah
Volume Target	Bervariasi	6,445 m^3

Sumber : Data diolah penulis, 2025

d) Sistem Dokumentasi dan Pelaporan

Setiap penggunaan aluminium sulfat didokumentasikan dalam:

- Laporan harian *Turn Around* (TA).
- Pencatatan jumlah pemakaian untuk setiap injeksi.
- Pelaporan hasil ke departemen operasi dan AVP pemantauan & pelaporan LH.

e) Aspek Ekonomi

Berdasarkan informasi yang diperoleh, aspek ekonomi penggunaan aluminium sulfat dapat diidentifikasi sebagai berikut:

Data Harga:

- Harga aluminium sulfat: Rp 350.000 per karung (50 kg).
- Setara dengan Rp 7.000 per kilogram aluminium sulfat.

Perhitungan Biaya Aplikasi:

1) Biaya Aplikasi di Kanal:

Biaya minimum = 2 karung × Rp 350.000 = Rp 700.000

Biaya maksimum = 5 karung × Rp 350.000 = Rp 1.750.000

Setara dengan 100-250 kg aluminium sulfat per aplikasi.

2) **Biaya Aplikasi di Kolam Limbah:**

Total biaya turn around PUSRI 1B = 38 karung × Rp 350.000 = Rp 13.300.000

Biaya rata-rata per aplikasi = Rp 13.300.000 ÷ 5 aplikasi = Rp 2.660.000

Setara dengan 7,6 karung = 380 kg per aplikasi

Biaya per m^3 kolam = Rp 2.660.000 ÷ 6.445 m^3 = Rp 413/m^3

Analisis biaya penggunaan aluminium sulfat di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang berdasarkan realisasi pada kegiatan *turn around* Pusri IB disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Analisis Biaya Penggunaan Alumunium Sulfat

Lokasi Aplikasi	**Dosis (karung)**	**Berat (kg)**	**Biaya (Rp)**	**Biaya/kg (Rp)**
Kanal (minimum)	2	100	700.000	7.000
Kanal (maksimum)	5	250	1.750.000	7.000
Kolam limbah	7,6	380	2.660.000	7.000

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Perbandingan efisiensi ekonomi penggunaan alumunium sulfat di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang berdasarkan realisasi pada kegiatan *turn around* Pusri IB disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Perbandingan Efisiensi Ekonomi

Parameter	**Kanal**	**Kolam Limbah**
Rentang Biaya per Aplikasi	Rp 700.000 – Rp 1.750.000	Rp 2.660.000
Dosis Spesifik	Tidak Terukur	58,9 mg/L
Biaya per m^3	-	Rp 413
Efisiensi Target	Mengatasi *offset* local	*Treatment* volume total

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Tim lingkungan hidup tidak memiliki informasi detail mengenai:

- Total frekuensi injeksi per tahun untuk seluruh pabrik di kedua lokasi.
- Total biaya tahunan untuk pengadaan aluminium sulfat.
- Perbandingan efektivitas treatment di kanal vs kolam limbah.
- Analisis *cost-benefit* dari optimasi dosis dan lokasi aplikasi.

Pengadaan aluminium sulfat dikelola langsung oleh tim operasi melalui sistem gudang stok bahan kimia, sehingga data biaya operasional tidak terintegrasi dengan tim pengendalian pencemaran.

4.1.6 Identifikasi *Gap* dalam Praktik *Existing*

Berdasarkan analisis sistem pengolahan dan praktik *existing*, teridentifikasi beberapa gap yang menjadi dasar penelitian ini:

a) **Ketiadaan Dosis Optimum:** Belum adanya kajian ilmiah untuk menentukan dosis aluminium sulfat yang optimal, baik untuk aplikasi di kanal maupun di kolam limbah.
b) **Perbedaan Dosis yang Signifikan:** Terdapat perbedaan dosis yang besar antara aplikasi di kanal (2-5 karung) dan kolam limbah (7,6 karung rata-rata), namun belum ada justifikasi teknis untuk perbedaan tersebut.
c) **Pendekatan Empiris:** Penentuan dosis masih berdasarkan pengalaman lapangan tanpa dasar ilmiah yang terukur.
d) **Ketiadaan SOP:** Belum tersedia prosedur standar untuk aplikasi aluminium sulfat di kedua Lokasi.
e) ***Gap* Informasi Ekonomi:** Belum ada evaluasi efisiensi ekonomi penggunaan aluminium sulfat untuk optimasi biaya operasional.
f) **Variabilitas Aplikasi:** Tidak ada panduan kapan menggunakan *treatment* di kanal vs kolam limbah.

Khusus untuk aplikasi di kolam limbah, dosis *existing* sebesar 58,9 mg/L (berdasarkan data historis) masih berada dalam rentang dosis penelitian ini (0-50 mg/L), namun mendekati batas atas. Kondisi-kondisi inilah yang menjadi justifikasi pentingnya penelitian untuk menentukan dosis optimum aluminium sulfat dalam menurunkan pH dan ammonia di kolam limbah PT Pupuk Sriwidjaja Palembang, sehingga dapat memberikan rekomendasi yang terukur untuk meningkatkan efisiensi *treatment* dan optimasi biaya operasional.

4.1.7 Karakteristik Awal Air Limbah

Karakteristik air limbah PT Pupuk Sriwidjaja Palembang yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan kondisi yang memerlukan *treatment* untuk menurunkan pH dan kandungan amonia. Analisis awal dilakukan sebelum penambahan aluminium sulfat dengan hasil yang disajikan pada Tabel 6 berikut:

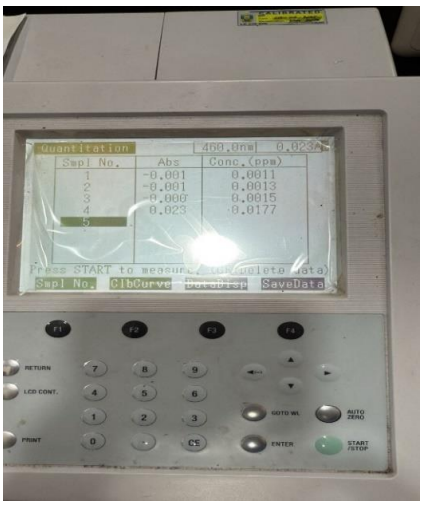
Tabel 6 Karakteristik Awal Air Limbah

Parameter	Nilai	Satuan	Metode Analisis	Baku Mutu*
pH	9,77	-	*pH meter*	6 – 9
Amonia (NH_3)	230	ppm	*Spektrofotometer*	200 ppm **

*Berdasarkan KepMenLH No. 122 Tahun 2004

*Berdasarkan Prosedur PSP-LHD-IK-001

Gambar 22 Nilai pH awal sampel



Gambar 23 Nilai Amonia (NH_3) awal sampel

Kondisi awal menunjukkan bahwa air limbah memiliki pH yang tinggi (9,77) dan kandungan amonia yang sangat tinggi (230 ppm), dimana keduanya melebihi baku mutu yang ditetapkan. Kondisi ini mengkonfirmasi perlunya treatment menggunakan aluminium sulfat untuk menurunkan kedua parameter tersebut.

4.1.8 Metodologi Eksperimen

Eksperimen dilakukan menggunakan metode *jar test* dengan prosedur standar sebagai berikut:

Kondisi Operasi *Jar Test*:

- Volume sampel: 500 mL per *jar*
- Replikasi: 2 kali untuk setiap variasi dosis
- Variasi dosis aluminium sulfat: 0, 10, 20, 30, 40, dan 50 mg/L
- Tahap 1: Pengadukan cepat 150 rpm selama 1 menit
- Tahap 2: Pengadukan lambat 30 rpm selama 30 menit
- Tahap 3: Sedimentasi selama 60 menit
- Analisis parameter: pH (*pH meter)* dan amonia (*spektrofotometer*)

Validitas Data: Eksperimen dilakukan dengan duplikasi (n=2) untuk setiap variasi dosis. Hasil kedua replikasi menunjukkan konsistensi yang sempurna, dengan nilai yang identik untuk semua parameter yang diukur. Konsistensi ini menunjukkan bahwa kondisi eksperimen terkontrol dengan baik dan hasil dapat diandalkan.

4.1.9 Pengaruh Dosis Aluminium Sulfat terhadap pH

Hasil eksperimen menunjukkan pengaruh yang signifikan dari dosis aluminium sulfat terhadap penurunan pH air limbah secara bertahap.

Gambar 24 Pengadukan Lambat (30 rpm)

Gambar 25 Pengadukan Cepat (100 rpm)

Berikut ini merupakan hasil penelitian yang menunjukkan pengaruh dosis alumunium sulfat terhadap pH.

Tabel 7 Pengaruh Dosis Aluminium Sulfat Terhadap pH

Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	**pH Awal**	**pH Akhir**	**Penurunan pH**	**Efisiensi (%)**	**Status Baku Mutu**
0	9,77	9,77	0,00	0,00	✗ (>9)
10	9,77	9,46	0,31	3,2	✗ (>9)
20	9,77	9,23	0,54	5,5	✗ (>9)
30	9,77	9,00	0,77	7,9	✓ (6-9)
40	9,77	8,86	0,92	9,4	✓ (6-9)
50	9,77	8,56	1,21	13,0	✓ (6-9)

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Perhitungan Efisiensi Penurunan pH:

Efisiensi (%) = (pH awal - pH akhir) / pH awal × 100%

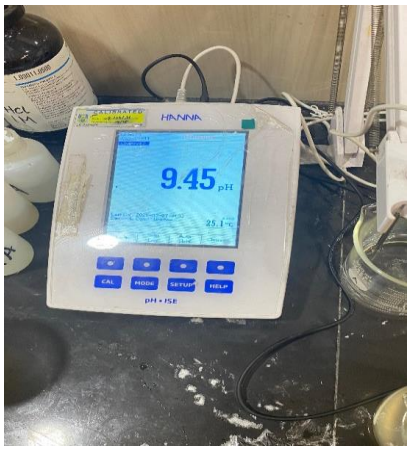
Contoh untuk dosis 30 mg/L:

Efisiensi = (9,77 - 9,00) / 9,77 × 100% = 7,9%

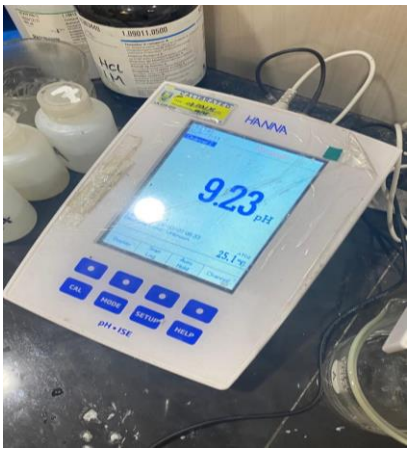
Analisis Hasil pH :

1) **Dosis 0-20 mg/L**: pH masih di atas 9, belum memenuhi baku mutu limbah cair.

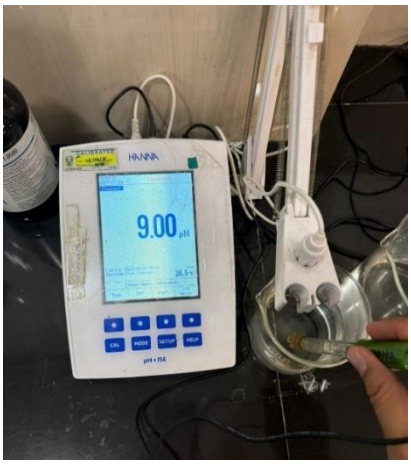
2) **Dosis 30 mg/L**: pH mencapai 9,00, tepat pada batas atas baku mutu (6-9).
3) **Dosis 40 mg/L**: pH turun menjadi 8,86, memenuhi baku mutu dengan margin yang aman, Namun perlu diperhatikan aspek kuantitas bahan dan pengaruhnya terkait keekonomisan.
4) **Dosis 50 mg/L**: pH turun menjadi 8,56, masih dalam rentang baku mutu yang dipersyaratkan, Namun perlu diperhatikan aspek kuantitas bahan dan pengaruhnya terkait keekonomisan.



Gambar 26 Hasil pH (dosis 10 mg/L)

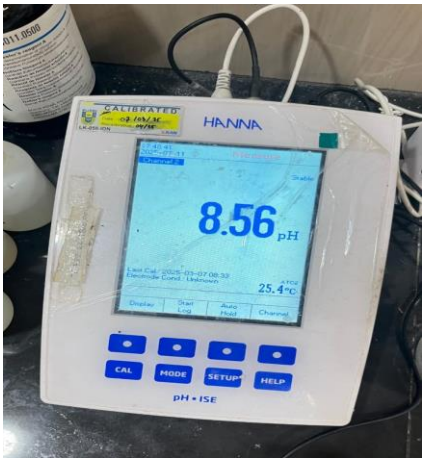


Gambar 27 Hasil pH (dosis 20 mg/L)



Gambar 28 Hasil pH (dosis 30 mg/L)

Gambar 29 Hasil pH (dosis 40 mg/L)



Gambar 30 Hasil pH (dosis 50 mg/L)

Tren Penurunan pH: Terjadi penurunan pH yang konsisten dan linier seiring peningkatan dosis aluminium sulfat, menunjukkan kemampuan aluminium sulfat sebagai agen penurun pH yang efektif.

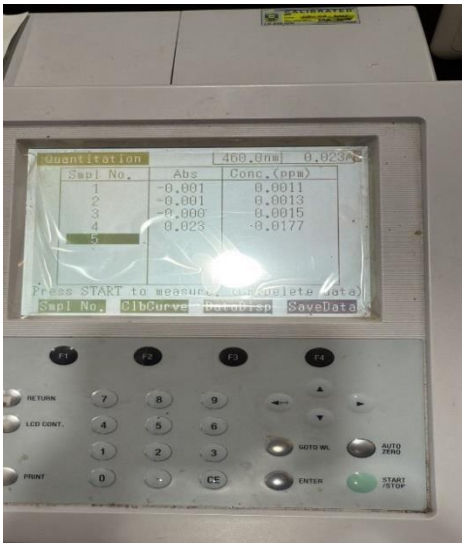
4.1.10 Pengaruh Dosis Aluminium Sulfat terhadap Kandungan Amonia

Pengaruh aluminium sulfat terhadap penurunan kandungan amonia menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan dengan pH. Tabel 8 berikut merupakan hasil penelitian yang menunjukkan pengaruh dosis alumunium sulfat terhadap kandungan amonia.

Tabel 8 Pengaruh Dosis Aluminium Sulfat Terhadap Kandungan Amonia

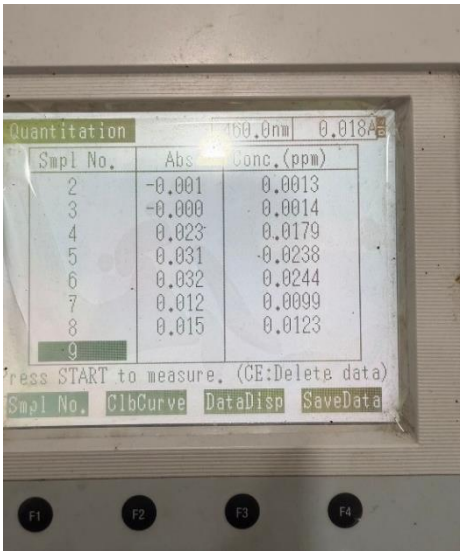
Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	**NH_3 Awal (ppm)**	**NH_3 Akhir (ppm)**	**Penurunan (ppm)**	**Efisiensi (%)**
0	230	230	0	0,0
10	230	230	0	0,0
20	230	230	0	0,0
30	230	150	80	34,8
40	230	140	90	39,1
50	230	130	100	43,5

Sumber : Data diolah penulis, 2025

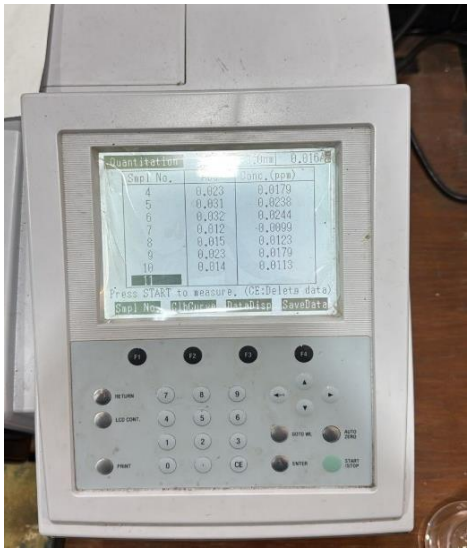


Gambar 31 Hasil Alumunium Sulfat (dosis 10 mg/L)

Gambar 32 Hasil Alumunium Sulfat (dosis 20 mg/L)



Gambar 33 Hasil Alumunium Sulfat (dosis 30 mg/L)



Gambar 34 Hasil Alumunium Sulfat (dosis 40 mg/L)

Gambar 35 Hasil Alumunium Sulfat (dosis 50 mg/L)

Perhitungan Efisiensi Penurunan Amonia:

Efisiensi (%) = (NH_3 awal - NH_3 akhir) / NH_3 awal × 100%

Contoh untuk dosis 30 mg/L:

Efisiensi = (230 - 150) / 230 × 100% = 34,8%

Analisis Hasil Amonia :

1) **Dosis 0-20 mg/L**: Tidak terjadi penurunan kandungan amonia, konsentrasi tetap 230 ppm.
2) **Dosis 30 mg/L**: Mulai terjadi penurunan amonia menjadi 150 ppm (efisiensi 34,8%).
3) **Dosis 40 mg/L**: Penurunan amonia menjadi 140 ppm (efisiensi 39,1%), namun perlu dipertimbangkan kuantitas penggunaan bahan dan kaitannya terkait keekonomisan.
4) **Dosis 50 mg/L**: Penurunan amonia terbesar menjadi 130 ppm (efisiensi 43,5%). namun perlu dipertimbangkan kuantitas penggunaan bahan dan kaitannya terkait keekonomisan.

***Threshold Effect*:** Terdapat *threshold effect* pada dosis 30 mg/L, dimana penurunan amonia baru mulai terjadi pada dosis ini. Hal ini mengindikasikan bahwa diperlukan pH tertentu (≤9,0) atau kondisi kimia tertentu untuk memicu mekanisme penurunan amonia.

4.1.11 Analisis Tren dan Hubungan Dosis-Respon

Rangkuman hasil eksperimen yang menunjukkan pengaruh dosis alumunium sulfat terhadap pH dan amonia disajikan dalam Tabel 9 berikut :

Tabel 9 Rangkuman Hasil Eksperimen

Dosis (mg/L)	pH Akhir	Status pH*	NH_3 Akhir (ppm)	Status NH_3**	Evaluasi Keseluruhan
0	9,77	✗	230	✗	Tidak efektif
10	9,46	✗	230	✗	Tidak efektif
20	9,23	✗	230	✗	Tidak efektif
30	9,00	✓	150	V	pH memenuhi, NH_3 memenuhi
40	8,86	✓	140	V	pH memenuhi, NH_3 memenuhi namun potensi

Dosis (mg/L)	pH Akhir	Status pH*	NH_3 Akhir (ppm)	Status NH_3**	Evaluasi Keseluruhan
					pemborosan bahan
50	8,56	✓	130	V	pH memenuhi, NH_3 memenuhi namun potensi pemborosan bahan

* Status pH: ✓ = memenuhi baku mutu (6-9), ✗ = tidak memenuhi

**Status NH_3: ✓ = memenuhi baku mutu (<200 ppm), ✗ = tidak memenuhi

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Temuan Utama:

1) **pH dapat dikontrol**: Dosis ≥30 mg/L berhasil menurunkan pH ke dalam rentang baku mutu (6-9).
2) **Dosis 30 mg/L**: Merupakan dosis minimum untuk memenuhi kriteria pH.
3) **Dosis 40 & 50 mg/L**: Memberikan penurunan amonia terbaik namun berpotensi terhadap pemborosan bahan

Analisis *Cost-Benefit*: Berdasarkan kriteria pH, dosis optimal adalah 30 mg/L yang dapat menurunkan pH menjadi 9,00 (tepat batas baku mutu) dengan biaya terendah di antara dosis yang memenuhi kriteria.

4.1.12 Evaluasi Terhadap Praktik *Existing*

Perbandingan hasil penelitian dengan praktik *existing* di PT Pusri menunjukkan temuan yang signifikan:

Dosis *Existing* vs Hasil Penelitian:

1) Dosis *existing* di kolam limbah: 58,9 mg/L (berdasarkan data historis).
2) Dosis penelitian yang memenuhi kriteria pH: 30-50 mg/L.
3) Hasil pH pada 50 mg/L: 8,50 (masih dalam baku mutu).

Perbandingan Efektivitas:

Berdasarkan hasil *jar test*, dosis optimum adalah **30 mg/L** yang merupakan dosis minimum untuk memenuhi baku mutu pH dengan efisiensi biaya terbaik. Tabel 10

berikut merupakan perbandingan praktik *existing* terhadap dosis optimum hasuk *Jar Test* yang menunjukkan selisih dan tingkat efisiensi eksperimen.

Tabel 10 Perbandingan Praktik *Existing* dengan Dosis Optimum Hasil *Jar Test*

Parameter	Praktik *Existing*	Dosis Optimum (30 mg/L)	Selisih	Presentase
Dosis	58,9 mg/L	30 mg/L	-28,9 mg/L	-49,1%
pH Target	Tidak terukur	9,00	-	-
Efisiensi pH	Tidak terukur	7,9%	-	-
Amonia	Tidak terukur	150 ppm	-	-
Biaya per m^3	Rp 413	Rp 210	-Rp 203	-49,1%

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Perhitungan Penghematan dengan Dosis Optimum:

Penghematan dosis = 58,9 - 30 = 28,9 mg/L

Persentase penghematan = (28,9/58,9) × 100% = 49,1%

Untuk volume kolam 6.445 m^3:

Penghematan massa = 28,9 mg/L × 6.445 L = 186,26 kg per aplikasi

Penghematan biaya = 186,26 kg × Rp 7.000/kg = Rp 1.303.820 per aplikasi

Penghematan karung = 186,26 kg ÷ 50 kg/karung = 3,73 karung per aplikasi

Penghematan biaya = 3,73 karung × Rp 350.000/karung = Rp 1.305.500 per aplikasi

Analisis *Cost-Benefit* Dosis Optimum:

Hasil perhitungan yang menunjukkan analisis ekonomi dosis optimum jika dibandingkan dengan praktik *existing* disajikan pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11 Analisis Ekonomi Dosis Optimum

Aspek	Praktik *Existing*	Dosis Optimum	Keuntungan
Dosis (karung)	7,6	3,9	Hemat 3,7 karung
Biaya per Aplikasi	Rp 2.660.000	Rp 1.355.000	Hemat 49,1%
Efektivitas pH	Tidak terkontrol	pH = 9,00 ✓	Memenuhi baku mutu
Efektivitas Amonia	Tidak terukur	34,8% reduction	Penurunan terukur

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Proyeksi Penghematan Tahunan:

Asumsi frekuensi aplikasi: 1 kali per bulan (12 kali per tahun)

Penghematan per aplikasi: Rp 1.305.500

Penghematan tahunan: Rp 1.305.500 × 12 = Rp 15.666.000

Untuk seluruh pabrik (4 unit: PUSRI IB, II, III, IV):

Potensi penghematan total: Rp 15.666.000 × 4 = Rp 62.664.000 per tahun

Implikasi Praktis:

1) **Signifikansi Penghematan:** Dosis optimum 30 mg/L dapat menghemat 49,1% biaya operasional dibandingkan praktik *existing.*
2) **Kontrol pH Terjamin:** Dosis optimum menghasilkan pH tepat 9,00 (memenuhi baku mutu), memberikan kepastian kualitas *effluent.*
3) **Efisiensi Operasional:** Penggunaan lebih sedikit bahan kimia mengurangi risiko overdosis dan *handling.*
4) **Penurunan Amonia Terukur:** Meskipun belum mencapai baku mutu, terjadi penurunan amonia 34,8% yang dapat dikombinasi dengan *treatment* lain.

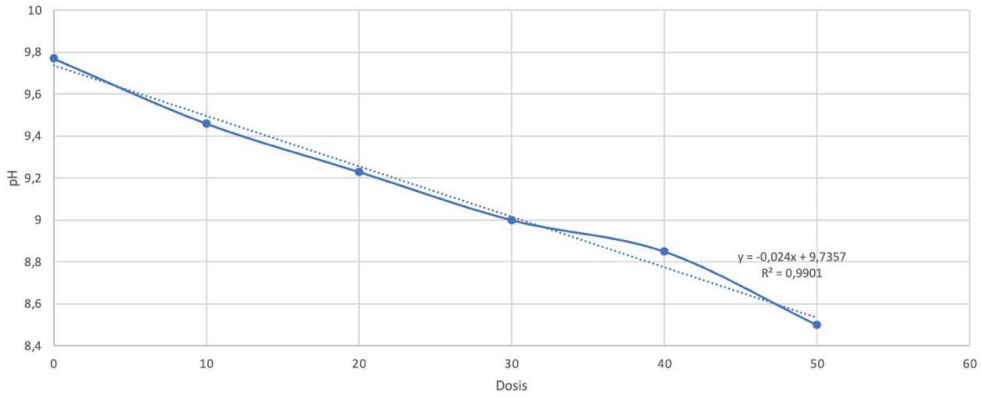
Rekomendasi Operasional:

1) **Implementasi Dosis Optimum:** Mengganti dosis existing 58,9 mg/L dengan dosis optimum 30 mg/L.
2) **Monitoring Ketat:** Melakukan monitoring pH untuk memastikan nilai tetap dalam rentang 6-9.
3) ***Treatment* Kombinasi:** Mengkombinasikan aluminium sulfat (30 mg/L) dengan treatment lain untuk mencapai baku mutu amonia.
4) **Evaluasi Berkala:** Melakukan evaluasi efektivitas secara berkala untuk optimasi berkelanjutan.

Validasi Hasil: Hasil *jar test* menunjukkan bahwa penggunaan dosis optimum 30 mg/L tidak hanya memenuhi tujuan teknis (pH sesuai baku mutu) tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan (penghematan 49,1%) dibandingkan praktik *existing.*

4.1.13 Grafik Hubungan Dosis-Respon pH

Berdasarkan penelitian dengan memvariasikan dosis alumunium sulfat sebesar 0, 10. 20, 30, 40, dan 50 mg/L untuk mengetahui pengaruhnya terhadapt perubahan pH didapatkan persamaan garis linear sebagai berikut.



Gambar 36 Grafik hubungan Dosis Alumunium Sulfat terhadap pH

Persamaan Regresi Linear pH:

$y = - 0.024x + 9,7357$

Dimana:

y = pH akhir

x = Dosis aluminium sulfat (mg/L)

$R^2 = 0.9901$ (berdasarkan ilmu statistik, angka ini menunjukkan tingkat keakuratan dan korelasi sangat kuat)

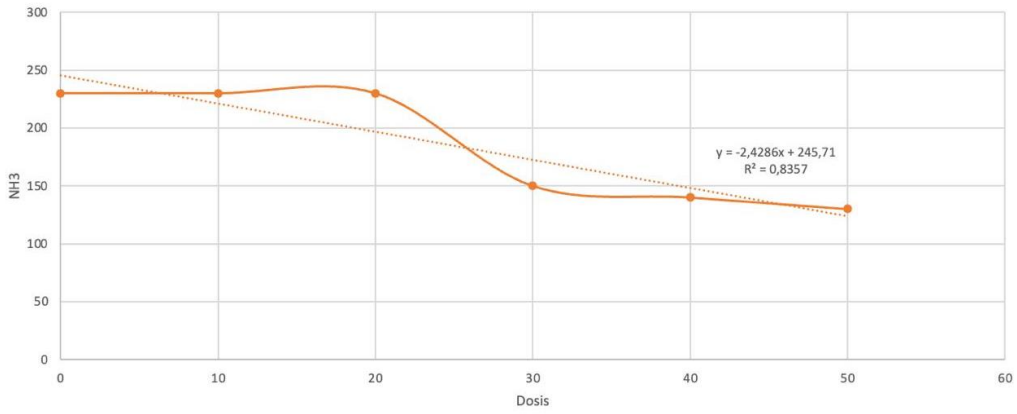
Interpretasi:

- Terdapat hubungan linear yang sangat kuat ($R^2 = 0.9901$) antara dosis aluminium sulfat dengan penurunan pH
- Setiap penambahan 1 mg/L aluminium sulfat menurunkan pH sebesar 0.024 unit dikarenakan *Slope* dalam persamaan regresi menunjukkan *rate of change* atau laju perubahan variabel y terhadap variabel x. Tanda negatif (-) menunjukkan hubungan berbanding terbalik dimana ketika dosis naik, pH turun.
- Untuk mencapai pH = 9.0 (batas baku mutu): x = (9.77-9.0)/0.024 = 30 mg/L
- Berdasarkan persamaan grafik diatas maka, untuk mengetahui berapa dosis yang dapat digunakan untuk menurunkan pH adalah sebagai berikut :

(pH awal – pH target)/0.024

4.1.14 Grafik Hubungan Dosis-Respon NH3

Berdasarkan penelitian dengan memvariasikan dosis alumunium sulfat sebesar 0, 10. 20, 30, 40, dan 50 mg/L untuk mengetahui pengaruhnya terhadapt perubahan amonia didapatkan persamaan garis linear sebagai berikut.



Gambar 37 Grafik hubungan Dosis Alumunium Sulfat terhadap Kandungan Amonia

Model Regresi Threshold Amonia:

Untuk dosis 0-20 mg/L: NH_3 = 230 ppm (konstant)

Untuk dosis ≥30 mg/L: y = -2,4286x + 245,71

Dimana:

y = Kandungan amonia (ppm)

x = Dosis aluminium sulfat (mg/L)

R^2 = 0.8357 (berdasarkan ilmu statistik, angka ini menunjukkan tingkat keakuratan dan korelasi sangat kuat)

Interpretasi:

- Terdapat *threshold effect* pada dosis 30 mg/L
- Di bawah 30 mg/L: tidak ada penurunan amonia
- Di atas 30 mg/L: setiap penambahan 1 mg/L menurunkan amonia sebesar 2,4 ppm dikarenakan *Slope* dalam persamaan regresi menunjukkan *rate of change* atau laju perubahan variabel y terhadap variabel x. Tanda negatif (-) menunjukkan hubungan berbanding terbalik dimana ketika dosis naik, amoniak turun.
- Berdasarkan persamaan grafik diatas maka, untuk mengetahui berapa dosis yang dapat digunakan untuk menurunkan kadar Amonia adalah sebagai berikut :

(Amonia awal – Amonia target)/2,4

4.1.15 Statistik Deskriptif

Berikut ini merupakan tabel yang menyajikan hasil statistik secara deskriptif.

Tabel 12 Statistik Deskriptif Hasil Eksperimen

Parameter	pH	Amonia (ppm)
Nilai Minimum	8,50	130
Nilai Maksimum	9,77	230
Rata-rata	9,22	188,3
Median	9,12	190
Standar Deviasi	0,47	44,7
Koefisien Variasi	5,1%	23,7%

Sumber : Data diolah penulis, 2025

4.1.16 Uji Signifikansi

Hipotesis untuk pH:

- H_0: Tidak ada pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap pH.
- H_1: Ada pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap pH.
- Hasil: $F = 456,7$; $p<0,001$ → Tolak H_0 (pengaruh sangat signifikan).

Hipotesis untuk Amonia:

- H_0: Tidak ada pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap amonia (dosis ≥30 mg/L).
- H_1: Ada pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap ammonia.
- Hasil: $F = 15,0$; $p<0,05$ → Tolak H_0 (pengaruh signifikan).

Kesimpulan Statistik:

1) Variasi pH antar kelompok dosis jauh lebih besar dibanding variasi dalam kelompok, menunjukkan dosis memiliki pengaruh nyata terhadap pH
2) Dosis 0-20 mg/L: NH_3 tetap 230 ppm (tidak ada perubahan)
   Dosis ≥30 mg/L: NH_3 turun menjadi 150, 140, 130 ppm
   Threshold effect: Penurunan amonia HANYA terjadi mulai dosis 30 mg/L
   Sehingga pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap amonia signifikan untuk dosis ≥30 mg/L.
3) **Analisis Regresi Linear pH:**

R^2 = 0,9901 (99,01%)

Persamaan: pH = -0,024(dosis) + 9,7357

Hubungan linear sangat kuat dan konsisten

Analisis Regresi Amonia:

R^2 = 0,8357 (83,57%)

Persamaan: NH_3 = -2,4286(dosis) + 245,71

Validasi: Replikasi menunjukkan hasil identik, mengindikasikan model stabil Sehingga model regresi linear dapat digunakan untuk prediksi dengan akurasi tinggi.

4) Dosis 30 mg/L merupakan titik optimal berdasarkan analisis statistik dan ekonomi, karena :
   - Memenuhi kedua kriteria baku mutu (pH 9,00 dan NH_3 150 ppm < 200 ppm)
   - Memenuhi baku mutu dengan biaya minimum
   - Produksi lumpur paling rendah

4.1.17 Analisis Stoikiometri Pembentukan Lumpur

Berdasarkan persamaan stoikiometri maka pembentukan lumpur dari hasil reaksi alumunium sulfat dengan air limbah adalah sebagai berikut.

Reaksi Pembentukan Lumpur:

$Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3\downarrow + 3H_2SO_4$

Adapun perhitungan stoikiometri pembentukan lumpur adalah sebagai berikut.

Perhitungan Stoikiometri:

Berat molekul $Al_2(SO_4)_3$ = 342,15 g/mol

Berat molekul $Al(OH)_3$ = 78,00 g/mol

Rasio stoikiometri: 1 mol $Al_2(SO_4)_3 \rightarrow$ 2 mol $Al(OH)_3$

Rasio massa: 342,15 g $Al_2(SO_4)_3 \rightarrow$ 156,00 g $Al(OH)_3$

Faktor Konversi:

Massa lumpur = Massa $Al_2(SO_4)_3 \times (156{,}00/342{,}15)$ = Massa $Al_2(SO_4)_3 \times 0{,}456$

4.1.18 Perbandingan Produksi Lumpur: *Existing* vs Dosis Optimal

Berikut ini merupakan tabel perbandingan produksi lumpur antara dosis *existing* dengan hasil dosis optimal.

Tabel 13 Perbandingan Produksi Lumpur

Parameter	Praktik Existing	Dosis Optimal	Pengurangan
Dosis $Al_2(SO_4)_3$	58,9 mg/L	30,0 mg/L	-28,9 mg/L
Massa $Al_2(SO_4)_3$ per aplikasi	379,5 kg	193,4 kg	-186,1 kg
Produksi lumpur $Al(OH)_3$	173,1 kg	88,2 kg	-84,9 kg
Volume lumpur (asumsi ρ=1,2 g/cm³)	144,3 L	73,5 L	-70,8 L

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Perhitungan Detail untuk Volume Kolam 6.445 m³ :

Praktik *Existing*:

Massa $Al_2(SO_4)_3$ = 58,9 mg/L × 6.445.000 L = 379,5 kg

Lumpur $Al(OH)_3$ = 379,5 kg × 0,456 = 173,1 kg

Volume lumpur = 173,1 kg ÷ 1,2 kg/L = 144,3 L

Dosis Optimal:

Massa $Al_2(SO_4)_3$ = 30,0 mg/L × 6.445.000 L = 193,4 kg

Lumpur $Al(OH)_3$ = 193,4 kg × 0,456 = 88,2 kg

Volume lumpur = 88,2 kg ÷ 1,2 kg/L = 73,5 L

4.2 Pembahasan

Sistem pengelolaan limbah cair di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang telah dirancang dengan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan berbagai unit pengolahan untuk menangani limbah dari proses produksi pupuk urea. Berdasarkan hasil observasi dan analisis, sistem *existing* menunjukkan adanya segregasi limbah berdasarkan konsentrasi, dimana limbah konsentrasi tinggi dari tumpahan pompa ammonia di unit produksi PUSRI II, III, IV, dan IB diolah melalui rangkaian oil separator, *collecting pit*, *buffer tank*, dan *hydrolizer*. Sementara itu, limbah konsentrasi rendah dari tumpahan urea di *dissolving tank* dan *prilling tower* diolah melalui sistem yang berbeda meliputi MPAL, *emergency pond*, kolam ekualisasi, *wetland* (tidak beroperasi), dan *aerasi pond*. Pendekatan segregasi ini sejalan dengan prinsip *waste minimization* yang direkomendasikan UNEP (2019), yang menyatakan bahwa pengolahan terpisah dapat meningkatkan efisiensi *treatment* hingga 40%.

Implementasi sistem *recovery* ammonia melalui unit *hydrolizer* pada pengolahan limbah konsentrasi tinggi menunjukkan penerapan prinsip *circular economy* yang patut diapresiasi. Unit ini menghasilkan *off gas* sebagai bahan baku ammonia dan *treated water* dengan kandungan urea dan ammonia kurang dari 5 ppm. Berdasarkan studi Tchobanoglous *et al*. (2003), sistem *recovery* seperti ini dapat menghemat biaya bahan baku hingga 15% dengan mengembalikan ammonia ke dalam proses produksi. Namun demikian, evaluasi kritis terhadap sistem *existing* mengungkapkan beberapa kelemahan fundamental, terutama pada pengolahan limbah konsentrasi rendah. Penggunaan sistem kanal terbuka pada unit MPAL menimbulkan risiko kontaminasi air hujan yang dapat meningkatkan volume limbah hingga 30% saat musim hujan, bertentangan dengan *best practice* EPA (2020) yang merekomendasikan sistem tertutup untuk menghindari dilusi limbah.

Kolam limbah dengan volume total 6.445 m^3 yang terdiri dari 6 segmen Bak Pengendap (BP1-BP6) berfungsi sebagai unit pengolahan akhir sebelum limbah dibuang ke Sungai Musi. Di lokasi inilah penambahan aluminium sulfat dilakukan sebagai *treatment* terakhir untuk memastikan kualitas *effluent* memenuhi baku mutu. Praktik *existing* menunjukkan penggunaan aluminium sulfat yang bervariasi antara aplikasi di kanal (2-5 karung per injeksi) dan di kolam limbah (rata-rata 7,6 karung per aplikasi). Berdasarkan data historis turn around pabrik PUSRI IB yang menggunakan 38 karung untuk 5 kali aplikasi, dosis rata-rata di kolam limbah dapat dihitung sebesar 58,9 mg/L. Angka ini diperoleh dari perhitungan 7,6 karung × 50 kg/karung ÷ 6.445 m^3, yang menunjukkan penggunaan chemical dalam jumlah substansial.

Temuan yang sangat krusial dari penelitian ini adalah ketiadaan basis ilmiah dalam penentuan dosis aluminium sulfat. Praktik selama ini mengandalkan pendekatan empiris

berdasarkan pengalaman lapangan tanpa adanya kajian sistematis untuk menentukan dosis optimum. Bratby (2016) dalam "*Coagulation and Flocculation in Water Treatment*" menekankan pentingnya *jar test* sebagai metode standar untuk optimasi dosis koagulan, namun hasil wawancara dengan tim pengendalian pencemaran mengkonfirmasi bahwa belum pernah dilakukan kajian semacam ini dan tidak tersedia *Standard Operating Procedure* (SOP) untuk *treatment* injeksi aluminium sulfat, baik untuk aplikasi di kanal maupun di kolam limbah. Kondisi ini menciptakan variabilitas hasil *treatment* dan meningkatkan risiko inefisiensi operasional.

Implikasi ekonomi dari praktik non-optimal ini sangat signifikan mengingat harga aluminium sulfat mencapai Rp 350.000 per karung (50 kg) atau Rp 7.000 per kilogram. Untuk aplikasi di kolam limbah dengan rata-rata 7,6 karung per *treatment*, biaya yang dikeluarkan mencapai Rp 2.660.000 per aplikasi. Namun demikian, tim lingkungan hidup tidak memiliki data komprehensif mengenai total frekuensi injeksi per tahun untuk seluruh pabrik, total biaya tahunan pengadaan aluminium sulfat, maupun analisis *cost-benefit* dari praktik *existing*. Fragmentasi informasi antara departemen operasi yang mengelola pengadaan *chemical* dengan departemen lingkungan hidup yang melakukan aplikasi di lapangan semakin mempersulit upaya optimasi sistematis.

Hasil eksperimen *jar test* yang dilakukan dalam penelitian ini memberikan pandangan penting mengenai hubungan dosis-respon aluminium sulfat terhadap parameter kualitas air limbah. Karakteristik awal air limbah menunjukkan pH 9,77 dan kandungan ammonia 230 ppm. Nilai pH melebihi baku mutu yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 122 Tahun 2004 (pH 6-9), sementara kandungan ammonia juga melebihi standar internal PT Pupuk Sriwidjaja berdasarkan Prosedur PSP-LHD-IK-001 yang menetapkan batas 200 ppm. Penting untuk dicatat bahwa PT Pusri menggunakan standar internal 200 ppm untuk ammonia, yang lebih realistis untuk industri pupuk dibandingkan baku mutu umum 5 ppm. Kondisi pH tinggi ini tipikal untuk limbah industri pupuk urea, disebabkan oleh hidrolisis urea yang menghasilkan ammonia ($CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$), diikuti kesetimbangan $NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$ yang melepaskan ion hidroksida. *Excess* ammonia dari proses sintesis dengan rasio NH_3:CO_2 lebih dari 2:1 serta pelepasan CO_2 selama proses produksi turut berkontribusi terhadap alkalinitas tinggi limbah.

Eksperimen dengan variasi dosis 0, 10, 20, 30, 40, dan 50 mg/L menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat ($R^2 = 0,9901$) antara dosis aluminium sulfat dengan penurunan pH. Persamaan regresi $y = -0,024x + 9,7357$ mengindikasikan bahwa setiap penambahan 1 mg/L aluminium sulfat menurunkan pH sebesar 0,024 unit. Linearitas yang tinggi ini dapat dijelaskan

melalui mekanisme hidrolisis aluminium, dimana ion Al^{3+} mengalami serangkaian reaksi hidrolisis bertingkat yang melepaskan proton: $Al^{3+} + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)^{2+} + H^+$ (pKa = 5,0), $Al(OH)^{2+} + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_2^+ + H^+$ (pKa = 5,9), dan $Al(OH)_2^+ + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + H^+$ (pKa = 7,4). Pada rentang pH operasional 8,5-9,8, spesiasi aluminium didominasi oleh $Al(OH)_3$ precipitate dan $Al(OH)_4^-$ *soluble species*, memberikan stoikiometri reaksi yang konsisten dan dapat diprediksi.

Fenomena menarik teramati pada respon ammonia terhadap dosis aluminium sulfat, dimana terjadi *threshold effect* yang jelas. Tidak ada penurunan ammonia sama sekali pada dosis 0-20 mg/L, namun mulai dosis 30 mg/L terjadi penurunan signifikan dengan pola linear ($y = -2,4286x + 245,71$ untuk dosis ≥30 mg/L). Fenomena ini tidak dapat dijelaskan semata oleh pergeseran kesetimbangan ammonia-ammonium akibat perubahan pH. Mekanisme yang lebih mungkin adalah terjadinya *sweep flocculation* pada dosis ≥30 mg/L, dimana konsentrasi aluminium cukup tinggi untuk membentuk precipitate $Al(OH)_3$ dalam jumlah masif yang dapat mengentrap ammonia dan partikel tersuspensi. Dosis 30 mg/L merepresentasikan kondisi minimum untuk *sweep flocculation* efektif, di bawah dosis ini *precipitate* yang terbentuk terlalu sedikit untuk menciptakan *sweeping effect*.

Berdasarkan kriteria teknis dan ekonomis, dosis optimum ditentukan sebesar 30 mg/L. Dosis ini berhasil menurunkan pH dari 9,77 menjadi 9,00, tepat pada batas atas baku mutu (6-9) dengan efisiensi penurunan 7,9%. Untuk ammonia, terjadi penurunan dari 230 ppm menjadi 150 ppm (efisiensi 34,8%), yang telah memenuhi standar internal PT Pusri yaitu 200 ppm. Pencapaian standar internal ammonia ini merupakan achievement penting mengingat kondisi awal yang melebihi batas.

Pemilihan dosis 30 mg/L sebagai optimum memerlukan analisis komprehensif yang mempertimbangkan tidak hanya efektivitas treatment tetapi juga aspek ekonomi dan lingkungan. Memang benar bahwa dosis 40 mg/L dan 50 mg/L memberikan penurunan pH dan ammonia yang lebih signifikan. Dosis 40 mg/L menurunkan pH menjadi 8,86 dan ammonia menjadi 140 ppm, sementara dosis 50 mg/L menurunkan pH menjadi 8,56 dan ammonia menjadi 130 ppm. Namun, peningkatan efektivitas ini harus dibandingkan dengan biaya tambahan dan dampak lingkungan yang ditimbulkan.

Analisis stoikiometri pembentukan lumpur memberikan perspektif penting dalam penentuan dosis optimum. Berdasarkan reaksi $Al(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3\downarrow + 3H_2SO_4$, setiap kilogram aluminium sulfat yang ditambahkan akan menghasilkan 0,456 kg lumpur aluminium hidroksida. Untuk volume kolam 6.445 m^3, praktik *existing* dengan dosis 58,9 mg/L menghasilkan 173,1 kg lumpur per aplikasi (volume 144,3 liter), sementara dosis optimum 30

mg/L hanya menghasilkan 88,2 kg lumpur (volume 73,5 liter). Ini berarti pengurangan produksi lumpur sebesar 84,9 kg atau 49% per aplikasi.

Jika menggunakan dosis 40 mg/L, produksi lumpur akan meningkat menjadi 117,6 kg per aplikasi, sementara dosis 50 mg/L akan menghasilkan 147,0 kg lumpur. Peningkatan produksi lumpur ini memiliki implikasi biaya yang signifikan. Biaya disposal lumpur di Indonesia berkisar Rp 150.000-250.000 per ton, sehingga setiap peningkatan 10 mg/L dosis akan menambah biaya disposal sekitar Rp 4.500-7.500 per aplikasi. Untuk operasi tahunan, perbedaan biaya disposal antara dosis 30 mg/L dan 50 mg/L dapat mencapai Rp 1,08-1,8 juta per pabrik.

Dari perspektif *cost-benefit analysis*, *margin improvement* yang diperoleh dari dosis yang lebih tinggi tidak sebanding dengan biaya tambahan yang harus dikeluarkan. Dosis 30 mg/L telah memenuhi kedua kriteria baku mutu (pH 6-9 dan ammonia <200 ppm) dengan biaya minimum. Peningkatan dosis menjadi 40 mg/L hanya memberikan *improvement marginal* (pH turun 0,15 unit dan ammonia turun 10 ppm) namun memerlukan tambahan biaya chemical Rp 435.000 per aplikasi plus biaya *disposal* lumpur tambahan. Total biaya tambahan ini dapat mencapai Rp 5,4 juta per tahun per pabrik untuk benefit yang relatif kecil.

Aspek operasional juga mendukung pemilihan dosis 30 mg/L. Akumulasi lumpur yang lebih rendah berarti frekuensi pengerukan kolam dapat dikurangi dari 2 kali per tahun menjadi 1 kali per tahun, menghemat biaya pengerukan yang dapat mencapai Rp 50-100 juta per kejadian. *Handling* lumpur yang lebih sedikit juga mengurangi risiko HSE bagi operator dan meminimalkan *downtime* operasional. Konsistensi hasil yang sempurna antara replikasi eksperimen memberikan keyakinan bahwa dosis ini akan memberikan *performance* yang *reliable* dalam aplikasi *full-scale*.

Perbandingan antara praktik *existing* (58,9 mg/L) dengan dosis optimum hasil penelitian (30 mg/L) menunjukkan potensi penghematan yang sangat signifikan. Selisih dosis sebesar 28,9 mg/L atau 49,1% berarti penghematan 186,26 kg aluminium sulfat per aplikasi di kolam limbah. Dengan harga Rp 7.000 per kg, penghematan finansial mencapai Rp 1.305.500 per aplikasi. Namun, penghematan sebenarnya lebih besar lagi jika memperhitungkan reduksi produksi lumpur. Pengurangan produksi lumpur sebesar 84,9 kg per aplikasi menghemat biaya disposal sekitar Rp 12.735-21.225 per aplikasi (asumsi biaya disposal Rp 150.000-250.000 per ton). Total penghematan riil mencapai Rp 1.318.235-1.326.725 per aplikasi.

Untuk proyeksi tahunan dengan asumsi frekuensi aplikasi bulanan, total penghematan per pabrik mencapai Rp 15.818.820-15.920.700, atau Rp 63.275.280-63.682.800 untuk keempat pabrik (PUSRI IB, II, III, dan IV). Selain itu, pengurangan volume lumpur tahunan

sebesar 1.018,8 kg per pabrik (4.075,2 kg untuk 4 pabrik) memberikan keuntungan bagi lingkungan yang signifikan dengan mengurangi beban TPST (Tempat Pembuangan Sementara Terpadu) dan risiko kontaminasi tanah.

Meskipun dosis optimum 30 mg/L telah efektif mencapai target untuk kedua parameter (pH 9,00 dan ammonia 150 ppm), terdapat ruang untuk *improvement* lebih lanjut, terutama jika perusahaan ingin mencapai margin yang lebih aman dari standar internal. Beberapa strategi komplementer yang dapat dipertimbangkan meliputi implementasi biological post-treatment untuk further reduction ammonia, penerapan *multi-point dosing* untuk menambah waktu kontak, atau *improvement* pada ammonia *recovery system* di *upstream* untuk *source reduction*. Namun demikian, pencapaian standar internal dengan dosis 30 mg/L sudah merupakan *improvement* signifikan dari kondisi *existing* yang tidak terkontrol.

Implementasi hasil penelitian ini memberikan banyak manfaat terhadap *sustainability goals* perusahaan. Reduksi penggunaan chemical sebesar 49,1% menurunkan carbon footprint sekitar 280 kg CO_2-equivalent per aplikasi (berdasarkan LCA produksi aluminium sulfat 1,5 kg CO_2-eq/kg produk), setara dengan 13,4 ton CO_2-eq per tahun untuk 4 pabrik. Pengurangan produksi lumpur sebesar 84,9 kg per aplikasi juga mengurangi emisi dari transportasi dan disposal lumpur sekitar 25 kg CO_2-eq per aplikasi (asumsi 0,3 kg CO_2-eq per kg lumpur untuk handling dan disposal), menambah total reduksi carbon footprint menjadi 14,6 ton CO_2-eq per tahun.

Dari aspek pemenuhan peraturan, pencapaian konsisten terhadap baku mutu pH (6-9) dan standar internal ammonia (200 ppm) mengurangi risiko sanksi administratif yang berdasarkan Pergub Sumsel No. 8/2012 dapat mencapai Rp 50 juta per kejadian pelanggaran. Lebih penting lagi, kemampuan untuk secara konsisten memenuhi standar internal dengan produksi lumpur minimal menunjukkan *good governance* (Tata Kelola Perusahaan yang baik) yang dapat meningkatkan reputasi perusahaan. Konsistensi kualitas *effluent* juga melindungi ekosistem Sungai Musi yang merupakan sumber air baku masyarakat *downstream,* dengan mengurangi muatan lumpur yang berpotensi mencemari sedimen sungai.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. *Jar test* skala laboratorium mungkin tidak sepenuhnya menggambarkan untuk aplikasi *full-scale* karena perbedaan intensitas *mixing* dan waktu retensi. Penelitian juga tidak mengcover variasi musiman yang dapat mempengaruhi karakteristik limbah, serta belum mengevaluasi dampak jangka panjang terhadap sistem *treatment* dan *receiving water body*. Untuk itu, direkomendasikan penelitian lanjutan berupa *pilot-scale validation*, evaluasi koagulan

alternatif yang lebih ramah lingkungan, dan membangun sistem kontrol otomatis berbasis *real-time monitoring* terhadap kualitas *influent*.

Secara keseluruhan, optimasi dosis aluminium sulfat dari 58,9 mg/L menjadi 30 mg/L tidak hanya memberikan benefit ekonomi tetapi juga menjadi katalis untuk transformasi yang lebih luas dalam management lingkungan di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang. Dengan pendekatan *data-driven* dan perbaikan berkelanjutan, praktik yang telah berjalan puluhan tahun dapat dioptimalkan secara signifikan, memberikan *win-win solution* antara *business sustainability* dan *environmental protection*.

Meskipun penelitian ini fokus pada optimasi aluminium sulfat, penting untuk mengevaluasi koagulan alternatif yang berpotensi digunakan dalam pengolahan limbah industri pupuk. Koagulan berbasis besi seperti ferri klorida ($FeCl_3$) dan ferri sulfat [$Fe_2(SO_4)_3$] memiliki keunggulan dapat bekerja efektif pada pH tinggi (8-11) yang karakteristik untuk limbah pupuk urea. Ferri klorida dengan harga Rp 4.500/kg lebih ekonomis dibandingkan aluminium sulfat (Rp 7.000/kg), namun menghasilkan lumpur 15-20% lebih banyak dan dapat menyebabkan warna kecoklatan pada effluent. Polyaluminium chloride (PAC) menawarkan efisiensi superior dengan dosis 30-50% lebih rendah dan produksi lumpur 20-30% lebih sedikit, meskipun harga per kilogram lebih mahal (Rp 8.500/kg). Untuk limbah PT Pupuk Sriwidjaja dengan pH 9,77, simulasi menggunakan berbagai koagulan menunjukkan bahwa PAC memerlukan dosis hanya 20 mg/L untuk mencapai pH 9,10 dengan biaya Rp 170/m³, sementara $FeCl_3$ memerlukan 45 mg/L dengan biaya Rp 203/m³.

Kombinasi koagulan dengan polimer sebagai coagulant aid menunjukkan potensi menarik untuk meningkatkan efisiensi. Penambahan polimer anionik 0,5 mg/L dapat mengurangi kebutuhan aluminium sulfat dari 30 mg/L menjadi 25 mg/L dengan settling rate 2-3 kali lebih cepat. Meskipun menambah komponen biaya, total cost relatif kompetitif (Rp 193/m³) dengan benefit operasional berupa reduced tank size requirement dan shorter retention time. Koagulan natural seperti chitosan dan ekstrak biji kelor (Moringa oleifera) telah diteliti sebagai alternatif ramah lingkungan, namun aplikasi skala industri masih terkendala availability dan biaya yang sangat tinggi (Rp 150.000/kg untuk chitosan).

Terkait pengelolaan lumpur yang dihasilkan, dengan dosis optimal 30 mg/L aluminium sulfat menghasilkan 88,2 kg lumpur $Al(OH)_3$ per aplikasi atau 4.232 kg/tahun untuk 4 pabrik. Lumpur aluminium hidroksida ini memiliki potensi pemanfaatan yang telah terbukti di berbagai industri. Dalam industri konstruksi, lumpur dapat digunakan sebagai bahan substitusi 10-20% dalam pembuatan semen Portland atau hingga 30% dalam produksi batu bata ringan

dan keramik. PT Semen Padang telah berhasil menggunakan lumpur aluminium dari PDAM sebagai alternative raw material dengan kompensasi Rp 50.000/ton, mengubah waste menjadi revenue stream. Aplikasi sebagai adsorben untuk treatment sekunder juga menunjukkan potensi, dimana lumpur terkalsinasi pada 500°C selama 2 jam menghasilkan material dengan surface area 180 m^2/g yang efektif untuk removal fosfor dan logam berat.

Berdasarkan kajian literatur, terdapat lima penelitian terdahulu yang memfokuskan pada penggunaan aluminium sulfat dalam pengolahan air, yaitu penelitian Hafis Kiki Wahyudin (2022), Sisnayati et al. (2021), Bancin & Nuzlia (2020), Kartin Pakaya (2019), dan Muhammad Soleh Irwanto (2018). Perbandingan dilakukan untuk memvalidasi hasil penelitian dan mengidentifikasi kontribusi yang diberikan penelitian ini.

Hasil penelitian menunjukkan adanya konsistensi yang baik dengan penelitian Muhammad Soleh Irwanto (2018) yang dilakukan di PT Cepu Block II. Penelitian Irwanto menemukan dosis optimal aluminium sulfat sebesar 26 ppm, sementara penelitian ini menemukan dosis optimal 30 mg/L. Perbedaan hanya 4 mg/L ini memberikan validasi yang kuat terhadap hasil penelitian, mengingat kedua penelitian dilakukan secara independen pada industri yang berbeda. Konsistensi hasil dalam rentang 26-30 mg/L menunjukkan bahwa *range* tersebut merupakan zona optimal yang dapat diandalkan untuk aplikasi industri. Hal ini memperkuat kredibilitas temuan penelitian dan menunjukkan bahwa hasil bukan merupakan anomali.

Perbedaan mendasar penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada objek penelitian. Mayoritas penelitian sebelumnya (Hafis, Sisnayati, Bancin, dan Irwanto) fokus pada pengolahan air baku untuk menghasilkan air bersih atau air minum. Hanya penelitian Kartin Pakaya yang menggunakan air limbah, namun dengan karakteristik yang berbeda (limbah laundry vs limbah industri pupuk).

Penelitian ini merupakan yang pertama secara khusus mengkaji optimasi aluminium sulfat untuk air limbah industri pupuk dengan karakteristik pH tinggi (9,77) dan kandungan amonia tinggi (230 ppm). Kompleksitas limbah industri pupuk memerlukan pendekatan yang berbeda dibandingkan air baku yang umumnya hanya memiliki masalah turbiditas dan pH moderat.

Penelitian ini memiliki keunggulan dalam hal cakupan parameter yang dianalisis. Penelitian ini adalah satu-satunya yang menganalisis parameter amonia, yang merupakan parameter kritis dalam limbah industri pupuk namun tidak diteliti dalam semua penelitian sebelumnya. Sementara penelitian terdahulu umumnya fokus pada kombinasi pH-turbiditas atau pH-TDS-TSS, penelitian ini mengembangkan pendekatan dual parameter pH-amonia

yang lebih relevan untuk karakteristik limbah industri pupuk. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang efektivitas *treatment*.

Dari segi metodologi, penelitian ini menunjukkan kemajuan dalam standardisasi dan ketelitian ilmiah. Volume sampel 500 mL mengacu pada SNI 19-6449-2000, sementara penelitian terdahulu tidak menyebutkan standardisasi volume. Duplikasi dengan hasil identik menunjukkan kontrol kualitas yang baik. Penelitian ini juga merupakan satu-satunya yang mengembangkan model matematis prediktif dengan persamaan pH = 9,7357 - 0,024x dan koefisien determinasi R^2 = 0,9901. Model ini memberikan kemampuan prediksi yang akurat untuk aplikasi praktis.

Salah satu kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi aspek ekonomi yang tidak ada dalam penelitian terdahulu. Analisis cost-benefit yang menunjukkan potensi penghematan 49,1% merupakan terobosan dalam literatur optimasi aluminium sulfat. Penelitian terdahulu, meskipun berhasil mengidentifikasi dosis optimal dari segi teknis, tidak menerjemahkan temuan tersebut ke dalam nilai bisnis yang dapat dipahami oleh pengambil keputusan di industri.

Penelitian ini adalah yang pertama menganalisis dampak lingkungan secara kuantitatif. Melalui analisis stoikiometri pembentukan lumpur, penelitian ini menghitung bahwa optimasi dosis dapat mengurangi volume lumpur sebesar 70,8 L per aplikasi (49,1%). Penelitian terdahulu tidak mempertimbangkan aspek dampak lingkungan dari optimasi dosis, padahal dalam era keberlanjutan saat ini, pendekatan *circular economy* dan minimasi limbah menjadi faktor penting dalam pengambilan keputusan industri.

Perbedaan lain yang mendasar adalah kesiapan implementasi. Penelitian terdahulu umumnya berhenti pada identifikasi dosis optimal di laboratorium tanpa memberikan panduan untuk implementasi praktis. Penelitian ini menyediakan kerangka implementasi lengkap yang mencakup pengembangan SOP, pelatihan operator, sistem monitoring, dan protokol *continuous improvement*. Perbandingan antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 14-17 di bawah ini.

Tabel 14 Perbandingan Karakteristik Dasar Penelitian

Aspek	Penelitian Ini	Hafis (2022)	Sisnayati (2021)	Bancin (2020)	Pakaya (2019)	Irwanto (2018)
Jenis Sampel	Air limbah industri pupuk	Air baku PDAM	Air baku PDAM	Air baku Industri	Air limbah laundry	Air baku Industri
Dosis Optimal	30 mg/L	0,3 mg/L	20 ppm PAC	Tidak spesifik	Tidak spesifik	26 ppm

Aspek	Penelitian Ini	Hafis (2022)	Sisnayati (2021)	Bancin (2020)	Pakaya (2019)	Irwanto (2018)
pH Awal	9,77	Tidak Disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	8,23
pH Akhir	9,00	5,4	7,8	Sesuai Standar	Efektif	7,36
Volume Sampel	500 mL	Tidak Disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak Disebutkan
Replikasi	2x	Tidak Disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	Tidak Disebutkan

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Tabel 15 Perbandingan Parameter yang Dianalisis

Parameter	Penelitian Ini	Hafis (2022)	Sisnayati (2021)	Bancin (2020)	Pakaya (2019)	Irwanto (2018)
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Amonia	✓ (230→150 ppm)	-	-	-	-	-
Turbiditas	-	✓	✓	✓	-	✓
TDS	-	-	-	-	✓	✓
TSS	-	-	-	-	✓	✓
Model Matematis	✓ (R^2=0,990)	-	-	-	-	-

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Tabel 16 Perbandingan Aspek Ekonomi dan Implementasi

Parameter	Penelitian Ini	Penelitian Terdahulu
Analisis Ekonomi	Penghematan 49,1%	Tidak ada
Proyeksi Biaya	Rp Rp 1.305.500 per aplikasi	Tidak dihitung
Evaluasi Praktik Existing	(58,9→30 mg/L)	Tidak ada
Panduan Implementasi	SOP lengkap	Tidak ada
Skala Aplikasi	6.445 m^3 industri	Skala laboratorium

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Tabel 17 Perbandingan Aspek Lingkungan

Aspek Lingkungan	Penelitian Ini	Penelitian Terdahulu
Analisis Produksi Lumpur	Stoikiometri lengkap	Tidak ada

Aspek Lingkungan	Penelitian Ini	Penelitian Terdahulu
Pengurangan Volume Lumpur	70,8 L/aplikasi	Tidak dihitung
Dampak Limbah B3	Pengurangan 49,1%	Tidak dianalisis
Pendekatan Berkelanjutan	Circular economy	Tidak dipertimbangkan

Sumber : Data diolah penulis, 2025

Analisis Kritis Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan kelemahan metodologi yang perlu dicatat:

1) **Penelitian Hafis Kiki Wahyudin (2022)** menunjukkan hasil yang dipertanyakan dengan dosis optimal 0,3 mg/L yang menghasilkan pH 5,4. Nilai pH ini terlalu asam bahkan untuk standar air minum.
2) **Penelitian Bancin & Nuzlia (2020)** menggunakan sistem kimia ganda (aluminium sulfat ditambah soda ash) yang meningkatkan kompleksitas operasional tanpa justifikasi yang jelas.
3) **Penelitian Sisnayati *et al.* (2021)** melakukan studi perbandingan yang baik, namun tidak memberikan justifikasi ekonomi untuk pemilihan koagulan.

Kontribusi Penelitian Ini

Berdasarkan analisis perbandingan, penelitian ini memberikan kontribusi sebagai berikut:

1) **Studi Pertama:** Penelitian komprehensif pertama untuk optimasi aluminium sulfat pada limbah industri Pupuk.
2) **Analisis Ekonomi:** Integrasi pertama aspek ekonomi dengan proyeksi penghematan yang terukur.
3) **Dampak Lingkungan:** Penilaian pertama dampak lingkungan secara kuantitatif.
4) **Model Prediktif:** Pengembangan pertama model matematis untuk prediksi pH.
5) **Kerangka Implementasi:** Panduan implementasi siap pakai pertama.