

Mitigasi Emisi Gas Bau dari *Sludge* Industri Makanan Menggunakan *Low-Cost Adsorbents*: Evaluasi Kinerja dan Analisis Mekanisme Adsorpsi

Mochamad Zidan Sibromulis¹, Mohamad Mirwan²

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya
Koresponden email: : 22034010040@student.upnjatim.ac.id¹, mmirwan.tl@upnjatim.ac.id²

Diterima: 24 Juni 2026

Disetujui: 1 Juli 2026

Abstract

Food industry sludge is a residue of wastewater treatment with high organic content, making it prone to anaerobic decomposition and the generation of odorous compounds, particularly ammonia (NH₃) and hydrogen sulfide (H₂S) [14]. This study aimed to evaluate the effectiveness of low-cost natural adsorbents—zeolite, rice husk, and calcium carbonate (CaCO₃) derived from shellfish shells—applied individually and in combination, in reducing NH₃ and H₂S concentrations in food industry sludge. Batch experiments were conducted using adsorbent-to-sludge ratios of 1:3 (single treatment) and 1:1:3 (combined treatment) with contact times of 12, 24, and 48 hours. Analysis revealed that adsorbent type significantly affected the reduction of both NH₃ and H₂S. The CaCO₃–rice husk combination (1:1:3) achieved the highest average NH₃ reduction of 82.1%, while single rice husk (1:3) achieved the highest average H₂S reduction of 96.3%. The identified adsorption mechanism was a synergy of physisorption by zeolite through NH₄⁺ ion exchange, chemisorption by CaCO₃ through pH buffering, and porosity enhancement by rice husk. These findings indicate that combined natural adsorbents represent a promising and cost-effective alternative for the deodorization of food industry sludge.

Keywords: *food industry sludge; rice husk; calcium carbonate; hydrogen sulfide; deodorization*

Abstrak

Sludge industri makanan merupakan residu hasil pengolahan air limbah yang mengandung bahan organik tinggi sehingga rentan mengalami dekomposisi anaerobik dan menghasilkan senyawa bau, terutama amonia (NH₃) dan hidrogen sulfida (H₂S) [14]. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas adsorben alami berbiaya rendah (*low-cost adsorbents*), yaitu zeolit, sekam padi, dan kalsium karbonat (CaCO₃) dari cangkang kerang, baik secara tunggal maupun kombinasi, dalam menurunkan konsentrasi NH₃ dan H₂S pada sludge industri makanan. Pengujian dilakukan secara batch dengan rasio adsorben terhadap sludge 1:3 (perlakuan tunggal) dan 1:1:3 (perlakuan kombinasi) pada variasi waktu kontak 12, 24, dan 48 jam. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis adsorben berpengaruh signifikan terhadap penurunan konsentrasi NH₃ maupun H₂S. Kombinasi CaCO₃ dan sekam padi (1:1:3) memberikan rata-rata penurunan NH₃ tertinggi sebesar 82,1%, sementara sekam padi tunggal (1:3) memberikan rata-rata penurunan H₂S tertinggi sebesar 96,3%. Mekanisme adsorpsi yang teridentifikasi merupakan gabungan dari fisisorpsi oleh zeolit melalui pertukaran ion NH₄⁺, kemisorpsi oleh CaCO₃ melalui penyangga pH, serta perbaikan porositas media oleh sekam padi. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi adsorben alami berpotensi menjadi alternatif deodorisasi sludge industri makanan yang efektif dan ekonomis.

Kata Kunci: *lumpur industri makanan; sekam padi; kalsium karbonat; hidrogen sulfida; deodorisasi*

1. Pendahuluan

Industri makanan merupakan salah satu sektor yang menyumbang limbah dalam jumlah besar, terutama dalam bentuk sludge hasil pengolahan air limbah (instalasi pengolahan air limbah/IPAL) [14]. Sludge tersebut umumnya masih mengandung bahan organik, protein, dan lemak dalam konsentrasi tinggi sehingga di satu sisi berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber daya, namun di sisi lain menimbulkan permasalahan lingkungan berupa bau menyengat akibat dekomposisi anaerobik [14]. Aktivitas mikroba anaerob pada sludge menghasilkan senyawa volatil seperti amonia (NH₃) dan hidrogen sulfida (H₂S) yang berkontribusi terhadap pencemaran udara, mengganggu kenyamanan pekerja dan masyarakat di sekitar fasilitas pengolahan, serta menjadi indikator bahwa pengelolaan limbah belum berjalan optimal [14].

Secara regulatif, pengendalian bau di Indonesia mengacu pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 50 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebauan, yang menjadikan NH₃ dan H₂S

sebagai parameter kunci dalam penilaian intensitas bau. Kedua senyawa tersebut memiliki ambang penciuman yang sangat rendah sehingga tetap dapat menimbulkan keluhan masyarakat meskipun berada pada konsentrasi yang relatif kecil [9]. Berbagai metode deodorisasi telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini, yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi metode fisik (adsorpsi), kimia (netralisasi dan oksidasi), serta biologis (*biofilter* dan *biotrickling filter*) [8]. Di antara ketiganya, metode adsorpsi menggunakan material berpori dinilai paling sesuai untuk diterapkan secara in-situ pada skala kecil hingga menengah karena tidak memerlukan peralatan kompleks, berbiaya relatif rendah, dan dapat langsung diaplikasikan pada sumber bau [7].

Penggunaan adsorben alami berbiaya rendah (*low-cost adsorbents*) semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif adsorben sintesis karena ketersediaannya yang melimpah, harga yang murah, serta sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular pemanfaatan limbah pertanian dan perikanan [7]. Zeolit dikenal memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi sehingga efektif mengikat NH_3 dalam bentuk ion amonium melalui mekanisme pertukaran ion, sekaligus mampu mengadsorpsi H_2S secara fisik pada permukaan porinya [15]. Sekam padi, sebagai limbah pertanian yang melimpah, memiliki struktur berpori yang dapat menjebak senyawa volatil sekaligus memperbaiki porositas media sehingga mengurangi kondisi anaerob lokal penyebab terbentuknya H_2S [9]. Adapun kalsium karbonat (CaCO_3) dari cangkang kerang berperan sebagai penyangga pH yang menekan volatilitas amonia dan menetralkan senyawa asam hasil dekomposisi sulfur melalui reaksi kimia sederhana [3]. Ketiga adsorben ini memiliki mekanisme penyerapan yang berbeda namun berpotensi saling melengkapi apabila digunakan secara kombinasi.

Meskipun masing-masing adsorben tersebut telah banyak diteliti secara terpisah, kajian yang secara terpadu membandingkan kinerja adsorben tunggal dan kombinasi terhadap penurunan NH_3 dan H_2S pada sludge industri makanan, sekaligus mengaitkannya dengan mekanisme adsorpsi yang mendasarinya (fisorpsi, kemisorpsi, dan perbaikan porositas), masih terbatas [7]. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada efisiensi penurunan satu jenis senyawa odor tanpa menelaah secara mendalam interaksi antar-mekanisme ketika beberapa adsorben dikombinasikan dalam satu sistem [15]. Variasi rasio adsorben terhadap sludge serta waktu kontak juga merupakan faktor penting yang menentukan jumlah situs aktif dan tercapainya kesetimbangan adsorpsi, sehingga keduanya perlu dikaji secara sistematis untuk memperoleh kondisi optimum proses deodorisasi [15].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas zeolit, sekam padi, dan kalsium karbonat dari cangkang kerang, baik secara tunggal (rasio 1:3) maupun kombinasi (rasio 1:1:3), dalam menurunkan konsentrasi amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S) pada sludge industri makanan dengan variasi waktu kontak 12, 24, dan 48 jam. Penelitian ini juga menganalisis pengaruh jenis adsorben terhadap efektivitas penurunan kedua senyawa odor tersebut secara statistik, serta mengkaji mekanisme adsorpsi yang berperan pada masing-masing perlakuan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa rekomendasi kombinasi adsorben alami yang efektif dan ekonomis sebagai teknologi deodorisasi sludge industri makanan yang ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Lingkungan, UPN "Veteran" Jawa Timur,. Alat utama yang digunakan meliputi reactor adsorpsi *fixed packed batch* tertutup berkapasitas 8 Liter berbentuk silinder dengan ruang *headspace*, neraca analitik, dan spektrofotometer UV-Vis, pH meter, thermometer, pengaduk (*agitator*) dan juga *impinger air sampler* untuk menangkap udara pada ruang *headspace* reaktor *batch*.

Bahan utama meliputi *sludge* yang diperoleh dari IPAL industri makanan pada daerah Gresik yang bergerak pada jajanan kemasan yang kerap dikonsumsi masyarakat, zeolit alam, sekam padi, dan cangkang kerang (sebagai sumber CaCO_3), dan bahan kimia untuk analisa laboratorium seperti larutan penjerap H_2SO_4 0,01 N untuk amonia (NH_3) dan campuran zinc acetate 2% untuk H_2S , serta reagen analisis.

Persiapan Adsorben dan Sludge

Sludge segar dikumpulkan dilarutkan dan dihomogenisasi selama 24 jam sebagai upaya untuk mengkondisikan sampel dan mengoptimalkan penurunan polutan organik awal seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD) [13]. Sebelum proses perlakuan dengan material adsorben, *sludge* dianalisis melalui tahapan karakterisasi awal yang mencakup pengujian proksimat dan pengukuran nilai COD.

Pada tahap persiapan adsorben, berbagai material *low-cost* disiapkan melalui perlakuan fisik untuk memperluas area permukaan dan mengoptimalkan kapasitas adsorpsinya terhadap gas bau [10]. Zeolit dicuci bersih menggunakan aquadest, dikeringkan, lalu diayak guna mendapatkan dimensi ukuran partikel

yang seragam. Cangkang kerang dibersihkan dari residu kotoran, dikeringkan, dan dihancurkan secara mekanik hingga membentuk serbuk kalsium karbonat (CaCO_3). Sementara itu, sekam padi diaplikasikan dalam bentuk aslinya setelah melalui proses pembersihan dan pengeringan, tahapan ini dilakukan untuk menekan kadar air material dengan tetap mempertahankan integritas struktur serat silika alaminya yang efektif dalam menyerap kontaminan [6].

Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan faktorial dengan dua variabel bebas, yaitu jenis perlakuan adsorben dan waktu kontak. Tujuh taraf perlakuan diuji, terdiri atas satu kontrol (sludge tanpa adsorben) dan enam formulasi adsorben yang diaplikasikan secara tunggal maupun kombinasi biner, sebagaimana disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Variasi Perlakuan Adsorben dan Limbah Sludge Industri Makanan

Kode	Perlakuan Adsorben	Rasio
P0	Kontrol (sludge setelah aerasi, tanpa adsorben)	100% Sludge
P1	Sekam Padi (SP) : Sludge	1 : 3
P2	Cangkang Kerang (Ca) : Sludge	1 : 3
P3	Zeolit (Z) : Sludge	1 : 3
P4	Zeolit : Sekam Padi : Sludge	1 : 1 : 3
P5	Zeolit : Cangkang Kerang : Sludge	1 : 1 : 3
P6	Cangkang Kerang : Sekam Padi : Sludge	1 : 1 : 3

Sumber: Data Penelitian, 2026

Setiap formulasi dievaluasi pada tiga waktu kontak, yaitu 12, 24, dan 48 jam, untuk merepresentasikan fase awal, menengah, dan mendekati kesetimbangan dari proses adsorpsi. Seluruh perlakuan dilakukan dalam reaktor adsorpsi batch 8 liter pada suhu ruang ($25\text{--}34\text{ }^\circ\text{C}$).

Prosedur Deodorisasi

Adsorben dan sludge ditimbang sesuai rasio yang ditetapkan, kemudian dihomogenkan secara manual selama 2–3 menit untuk memastikan distribusi adsorben merata dan mencegah penggumpalan. Campuran selanjutnya dimasukkan ke dalam reaktor adsorpsi hingga memenuhi volume yang ditentukan, dan reaktor ditutup rapat untuk meminimalkan pertukaran udara dengan lingkungan luar selama masa inkubasi. Pengukuran bau, NH_3 , dan H_2S dilakukan secara berkala pada tiap waktu kontak (12, 24, dan 48 jam) melalui port *headspace* reaktor

Pengukuran Amonia (NH_3) dan Hidrogen Sulfida (H_2S)

Konsentrasi amonia diukur menggunakan metode indofenol mengacu pada SNI 19-7119.1-2005. Gas *headspace* dari tiap reaktor dialirkan melalui impinger berisi larutan penyerap H_2SO_4 0,01 N dengan laju alir 0,5 L/menit selama 10 menit. Amonia yang terjerap kemudian direaksikan dengan NaOCl dan natrium fenolat membentuk kompleks indofenol berwarna biru, diinkubasi 30 menit pada suhu ruang, dan diukur absorbansinya pada panjang gelombang 630 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis berdasarkan kurva kalibrasi. Volume gas contoh uji dikoreksi terlebih dahulu pada kondisi normal ($25\text{ }^\circ\text{C}$, 760 mmHg) sebelum perhitungan konsentrasi akhir.

Konsentrasi hidrogen sulfida diukur dengan metode iodometri mengacu pada SNI 6989.75:2009. Gas *headspace* dari tiap reaktor dialirkan melalui impinger berisi larutan penyerap asam sulfida (H_2S) yang berisikan campuran larutan *Zinc Sulfate Heptahydrate* ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), larutan Natrium Hidroksida (NaOH), dan Amonium Sulfat (NH_4)₂SO₄. Kemudian hasil serapan diberi dengan iodine 0,025 N berlebih direaksikan dengan titrasi balik menggunakan natrium tiosulfat 0,025 N menggunakan indikator amilum hingga warna cerah hilang sebagai titik akhir titrasi. Konsentrasi sulfida dihitung dari selisih jumlah iodine yang ditambahkan dengan tiosulfat yang terpakai, dinormalisasi terhadap volume sampel dan dikonversi menggunakan hitungan H_2S dari udara hasil serapan menggunakan *impinger air sampler*.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakterisasi Awal Sludge Industri Makanan

Sludge industri makanan yang digunakan dalam penelitian ini dikarakterisasi secara proksimat sebelum pelaksanaan proses adsorpsi. Komposisi proksimat sludge disajikan dalam **Tabel 2** dan memberikan informasi penting mengenai kandungan bahan organik yang akan menjadi sumber emisi gas bau.

Parameter Uji	Hasil	Satuan	Metode Analisis
Kadar Air	14,54	%	Gravimetri
Kadar Abu	0,85	%	Gravimetri
Protein	5,34	%	Kjeldahl
Lemak	10,97	%	Ekstraksi Soxhlet
Karbohidrat	68,30	%	By Difference
Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	323.43	mg/N.m ³	SNI 6989.75:2009
Amonia (NH ₃)	115.20	mg/N.m ³	SNI 19-7119.1- 2005

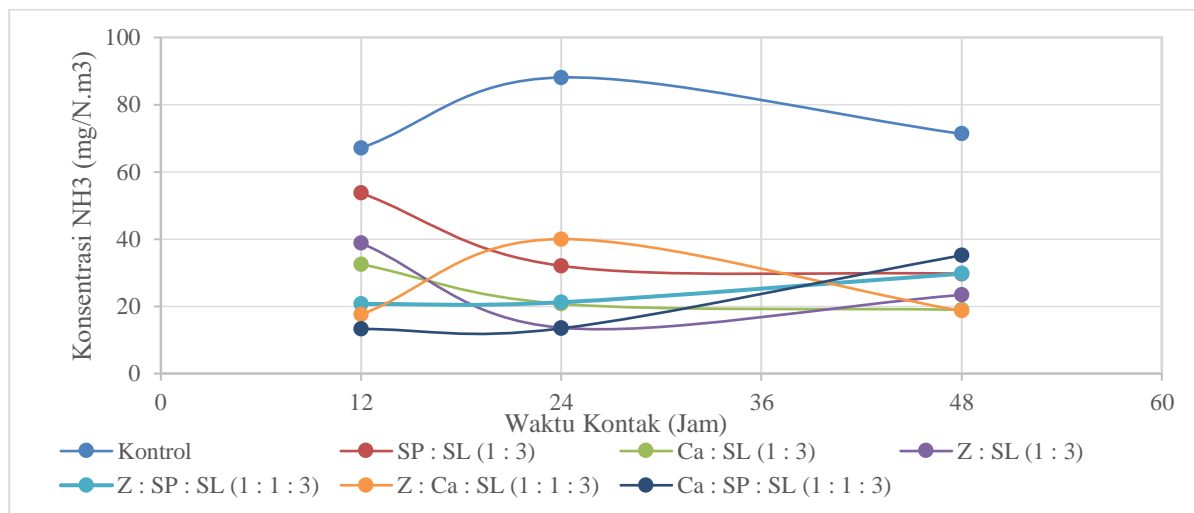
Sumber: Data Penelitian, 2026

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sludge industri makanan memiliki kandungan bahan organik yang sangat tinggi, khususnya karbohidrat (68,30%), diikuti lemak (10,97%) dan protein (5,34%). Kandungan organik yang tinggi ini mengindikasikan bahwa sludge masih memiliki potensi nilai guna sebagai sumber bahan baku, namun di sisi lain juga menciptakan lingkungan yang optimal bagi aktivitas mikroba anaerobik. Kadar air yang relatif rendah (14,54%) menunjukkan bahwa sludge memiliki karakteristik semi-padat, yang konsisten dengan sludge hasil pengolahan air limbah industri makanan melalui proses dehidrasi parsial [14].

Kandungan protein (5,34%) dan lemak (10,97%) pada sludge industri makanan ini secara teoritis menjadi substrat degradasi yang menghasilkan senyawa volatil penyebab bau. Protein yang mengalami proses deaminasi dalam kondisi anaerob menghasilkan amonia (NH₃), sedangkan lemak yang tereduksi dalam kondisi anaerob dapat menghasilkan berbagai senyawa volatil termasuk asam lemak rantai pendek dan derivat sulfur [2]. Tingginya kandungan karbohidrat (68,30%) menjadi sumber energi bagi komunitas mikroba anaerobik, khususnya bakteri pereduksi sulfat yang menghasilkan hidrogen sulfida (H₂S). Dengan demikian, komposisi proksimat sludge yang diteliti ini menciptakan kondisi yang sangat kondusif bagi pembentukan senyawa bau, sehingga penelitian ini menjadi relevan dan urgen dalam mencari solusi deodorisasi yang efektif.

Kinerja Penyisihan NH₃

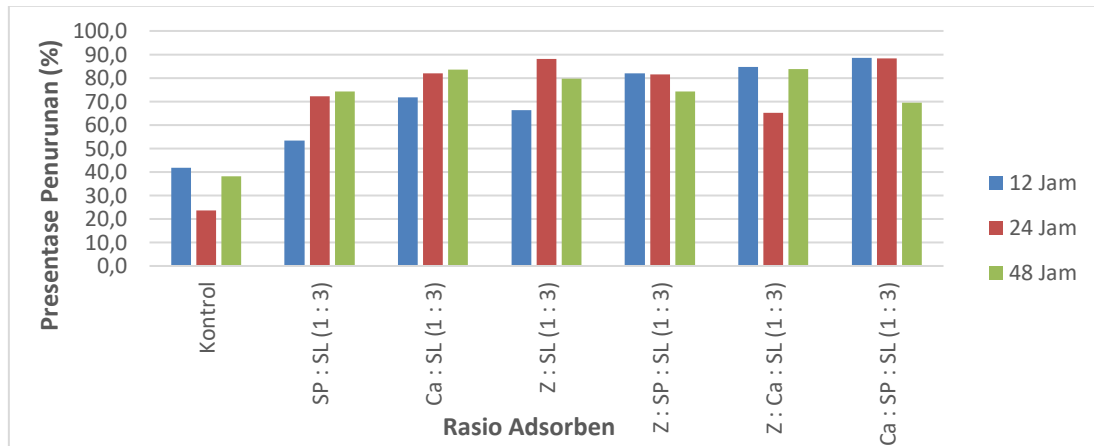
Penyisihan amonia merupakan parameter utama dalam evaluasi efektivitas adsorben karena amonia merupakan senyawa volatil penyebab bau yang paling dominan pada sludge industri makanan dengan ambang penciuman (*odor threshold*) yang rendah. Hasil pengukuran konsentrasi NH₃ pada setiap perlakuan menunjukkan pola penurunan yang signifikan dibandingkan kontrol. Konsentrasi NH₃ tertinggi diamati pada reaktor kontrol (tanpa adsorben) yang mencapai nilai rata-rata 75,50 mg/N.m³, dengan nilai tertinggi pada interval 24 jam mencapai 88,1 mg/N.m³. Tingginya konsentrasi NH₃ pada kontrol mengindikasikan bahwa sludge industri makanan menghasilkan emisi amonia yang sangat signifikan akibat proses degradasi anaerob bahan organik terutama protein tanpa adanya mekanisme pengendalian.



Gambar 1. Grafik Nilai Konsentrasi NH₃

Sumber : Data Penelitian, 2026

Seluruh reaktor perlakuan adsorben pada **Gambar 1** menunjukkan konsentrasi NH_3 yang jauh lebih rendah, berkisar antara 20,64 hingga 38,49 mg/N.m^3 . Perlakuan Ca:SP:SL (1:1:3) menunjukkan konsentrasi NH_3 terendah dengan rata-rata 20,63 mg/N.m^3 , diikuti oleh perlakuan Z:SP:SL (1:1:3) dengan 23,88 mg/N.m^3 , dan Ca:SL (1:3) dengan 24,08 mg/N.m^3 . Perlakuan SP:SL (1:3) menunjukkan konsentrasi tertinggi diantara semua perlakuan adsorben dengan 38,49 mg/N.m^3 , namun masih jauh lebih rendah daripada kontrol, menunjukkan bahwa sekam padi tunggal memiliki kapasitas penyisihan NH_3 yang lebih terbatas dibandingkan perlakuan dengan CaCO_3 atau kombinasi lainnya.



Gambar 2. Persentase Penurunan NH_3 (%) setelah Proses Deodorisasi
Sumber : Data Penelitian, 2026

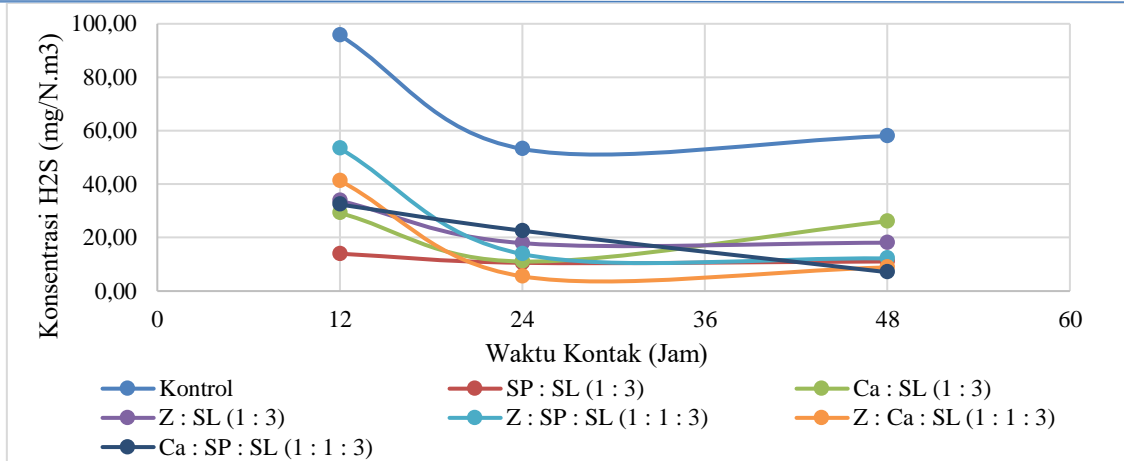
Efisiensi penyisihan NH_3 pada **Gambar 2** dihitung berdasarkan penurunan konsentrasi relatif terhadap kontrol sebelum aerasi dengan nilai 115,20 mg/N.m^3 dan bervariasi bergantung pada jenis dan rasio adsorben. Perhitungan efisiensi menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi Ca:SP:SL (1:1:3) mencapai efisiensi tertinggi sebesar 88,5%, artinya mampu menurunkan konsentrasi NH_3 hingga 88,5% dari nilai kontrol. Efisiensi tinggi ini juga dicapai oleh perlakuan tunggal Ca:SL (1:3) dengan 68,9% dan Z:SL (1:3) dengan 67,3%, meskipun masih di bawah kombinasi Ca:SP:SL.

Kinerja Penyisihan H_2S

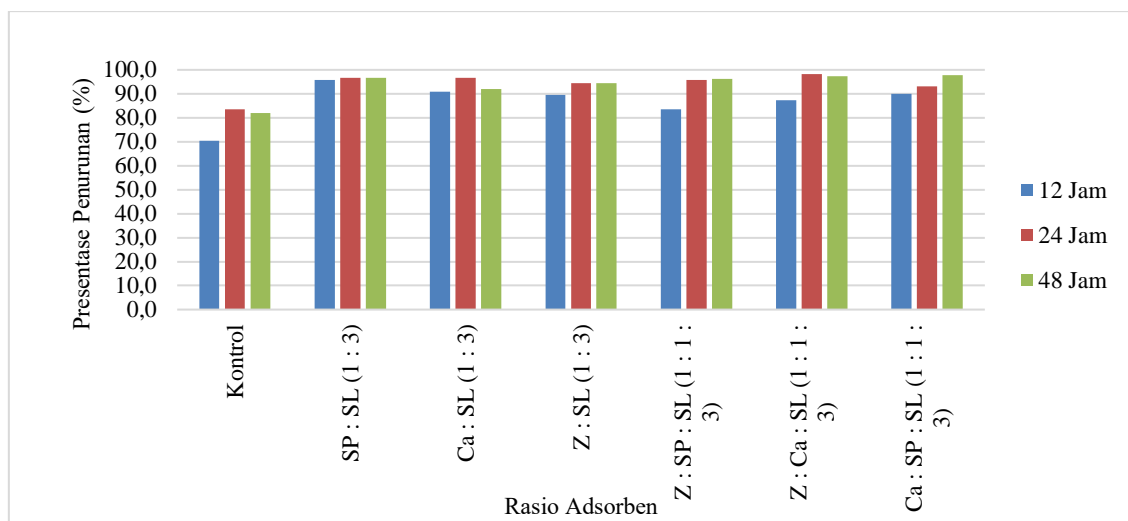
Penyisihan hidrogen sulfida merupakan parameter krusial karena H_2S memiliki ambang penciuman yang sangat rendah (9 ppb setara dengan 12,6 mg/N.m^3), sehingga konsentrasi kecil saja sudah dapat menimbulkan bau yang tidak menyenangkan. Selain itu, H_2S bersifat toksik pada konsentrasi tinggi dan berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan pada masyarakat sekitar [14]. Hasil pengukuran menunjukkan pola penyisihan H_2S yang berbeda secara signifikan dibandingkan dengan NH_3 .

Reaktor kontrol menghasilkan emisi H_2S yang sangat tinggi dengan rata-rata 68,97 mg/N.m^3 , mencapai puncaknya 95,7 mg/N.m^3 pada interval 12 jam, kemudian mengalami penurunan bertahap menjadi 80,6 mg/N.m^3 pada 24 jam dan 58,0 mg/N.m^3 pada 48 jam. Penurunan konsentrasi ini pada kontrol mengindikasikan adanya perubahan kondisi kimia atau biologis dalam sludge selama periode pengamatan, meskipun tanpa penambahan adsorben. Fenomena ini mungkin disebabkan oleh perubahan pH, deplesi substrat untuk bakteri pereduksi sulfat, atau mekanisme escape H_2S ke ruang headspace dan lingkungan sekitarnya [4].

Seluruh perlakuan adsorben pada **Gambar 3** menunjukkan konsentrasi H_2S yang jauh lebih rendah dibandingkan kontrol. Perlakuan SP:SL (1:3) mencapai konsentrasi terendah dengan rata-rata hanya 11,89 mg/N.m^3 , diikuti Z:Ca:SL (1:1:3) dengan 18,56 mg/N.m^3 dan Ca:SP:SL (1:1:3) dengan 20,68 mg/N.m^3 . Perlakuan tunggal Z:SL (1:3) menunjukkan konsentrasi 23,28 mg/N.m^3 , sementara Z:SP:SL (1:1:3) menunjukkan konsentrasi tertinggi di antara perlakuan dengan adsorben, yaitu 26,48 mg/N.m^3 . Tingginya konsentrasi pada Z:SP:SL (1:1:3) mungkin disebabkan oleh interaksi kompetitif antara zeolit dan sekam padi dalam menangkap H_2S , di mana zeolit dengan KTK tinggi lebih preferensial menangkap NH_4^+ dibandingkan H_2S [15].



Gambar 3. Grafik Nilai Konsentrasi H₂S
Sumber: Data Penelitian, 2026



Gambar 4. Persentase Penurunan H₂S (%) setelah Proses Deodorisasi
Sumber : Data Penelitian, 2026.

Efisiensi penyisihan H₂S pada Gambar 4 menunjukkan nilai yang lebih tinggi secara keseluruhan dibandingkan NH₃, mencerminkan sifat selektivitas adsorben yang berbeda terhadap kedua senyawa bau. Perlakuan SP:SL (1:3) mencapai efisiensi tertinggi sebesar 84,8%, artinya mampu menurunkan konsentrasi H₂S hingga 84,8% dari nilai control awal H₂S yang bernilai. Efisiensi yang tinggi ini diikuti oleh Ca:SP:SL (1:1:3) dengan 73,5%, Z:Ca:SL (1:1:3) dengan 76,2%, dan Ca:SL (1:3) dengan 71,7%. Perlakuan Z:SP:SL (1:1:3) menunjukkan efisiensi terendah di antara perlakuan adsorben dengan 66,1%, mengonfirmasi pengamatan konsentrasi sebelumnya bahwa kombinasi zeolit dan sekam padi tidak optimal untuk penyisihan H₂S.

Evaluasi Performa Adsorben

Secara umum, perlakuan kombinasi (Z:Ca:SL dan Ca:SP:SL) menunjukkan stabilitas performa yang lebih baik untuk mengatasi dua gas yang berbeda secara simultan, dibandingkan perlakuan tunggal yang fluktuatif pada waktu kontak terakhir pada 48 jam. Analisis komparatif antara perlakuan tunggal dan kombinasi memberikan wawasan mendalam mengenai sinergi mekanisme yang terjadi dan potensi aplikasi praktis pada skala industri.

Tabel 3. Ringkasan Performa Perlakuan Adsorben: Konsentrasi, Efisiensi, dan Ranking

Perlakuan	NH ₃ Rata-rata (mg/N.m ³)	Ranking NH ₃	H ₂ S Rata-rata (mg/N.m ³)	Ranking H ₂ S	Kinerja Keseluruhan	Potensi Aplikasi
Kontrol	75,50	-	68,97	-	Baseline	-
SP:SL(1:3)	38,49	5	11,89	1	Baik (H ₂ S)	Tinggi
Ca:SL(1:3)	24,08	3	22,13	4	Sedang	Sedang
Z:SL(1:3)	25,29	4	23,28	5	Sedang	Sedang

Z:SP:SL(1:1:3)	23,88	2	26,48	7	Fluktuatif	Rendah
Z:Ca:SL(1:1:3)	25,39	3	18,56	3	Stabil	Sedang
Ca:SP:SL(1:1:3)	20,63	1	20,68	2	Optimal dan Baik (NH ₃)	Sangat Tinggi

Sumber: Data Penelitian, 2026.

Hasil evaluasi perbandingan dalam **Tabel 3** menunjukkan pola yang jelas dalam hal selektivitas adsorben terhadap kedua senyawa bau. Perlakuan Ca:SP:SL (1:1:3) menunjukkan performa optimal untuk NH₃ dengan konsentrasi terendah 20,63 mg/N.m³, mencapai efisiensi penyisihan 88,5% yang tertinggi antara semua perlakuan. Sebaliknya pada perlakuan SP:SL (1:3) menunjukkan keunggulan dalam penyisihan H₂S dengan konsentrasi terendah 11,89 mg/N.m³, mencapai efisiensi 84,8% yang sangat tinggi.

Perbedaan juara antara dua perlakuan ini mengindikasikan sifat selektivitas adsorben yang fundamental. Zeolit dan CaCO₃, dengan mekanisme pertukaran ion dan penetralan pH, lebih efektif terhadap NH₃, terutama ketika dikombinasikan dengan sekam padi yang meningkatkan distribusi merata dari adsorben. Sebaliknya, sekam padi tunggal (SP:SL 1:3) lebih unggul dalam penyisihan H₂S melalui mekanisme dual yang menggabungkan adsorpsi fisik dan peningkatan kondisi aerobik yang menghambat produksi H₂S [9]. Fenomena ini menegaskan bahwa tidak ada adsorben universal yang optimal untuk kedua senyawa bau secara simultan.

Dari perspektif aplikasi industri, perlakuan Ca:SP:SL (1:1:3) dinilai memiliki potensi aplikasi tertinggi karena memiliki kemampuan deodorisasi silang (*cross-deodorization*) yang baik untuk kedua senyawa bau. Dengan ranking 1 untuk NH₃ dan ranking 2 untuk H₂S, kombinasi ini menawarkan solusi kompromi yang efektif untuk mengendalikan limbah sludge yang menghasilkan gas campuran (NH₃ dan H₂S sekaligus). Keseimbangan performa ini, dikombinasikan dengan biaya rendah adsorben alami terutama sekam padi dan cangkang kerang yang merupakan limbah, menjadikan perlakuan Ca:SP:SL (1:1:3) sangat potensial untuk diimplementasikan pada industri makanan skala menengah dan besar di Indonesia.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan adsorben alami memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap penurunan emisi gas beracun pada *sludge* industri makanan. Temuan utama mengidentifikasi bahwa kombinasi Ca:SP:SL (1:1:3) merupakan perlakuan terbaik untuk mitigasi NH₃ dengan efisiensi sebesar 88,5%, sementara perlakuan SP:SL (1:3) paling optimal untuk mereduksi H₂S dengan efisiensi hingga 97,8%. Mekanisme dominan yang terjadi adalah sinergi antara fiksasi ionik akibat *buffer* pH kalsium karbonat, dan perbaikan porositas fisik (*bulking agent*) oleh sekam padi yang memutus rantai reaksi pembentukan gas anaerobik. Oleh karena itu, modifikasi struktur *sludge* terbukti sama pentingnya dengan adsorpsi kimia. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk menguji kapasitas saturasi maksimum dari adsorben kombinasi ini pada skala prototipe IPAL industri.

5. Daftar Pustaka

- [1] Bai, W., Qian, M., Li, Q., Atkinson, S., Tang, B., Zhu, Y., & Wang, J. (2021). Rice husk-based adsorbents for removing ammonia: Kinetics, thermodynamics and adsorption mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105793. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105793>
- [2] Deng, Z., Ferreira, A. L. M., Spanjers, H., & van Lier, J. B. (2023). Anaerobic protein degradation: Effects of protein structural complexity, protein concentrations, carbohydrates, and volatile fatty acids. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101501. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101501>
- [3] Galera Martínez, M., Pham Minh, D., Nzihou, A., & Sharrock, P. (2020). Valorization of calcium carbonate-based solid wastes for the treatment of hydrogen sulfide in a semi-continuous reactor: Part II – Slurry bubble column pilot. *Chemical Engineering Journal*, 390, 124576. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124576>
- [4] Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojumi, S. A., Parchami, M., Parchami, M., Varjani, S., Khanal, S. K., Wong, J., Awasthi, M. K., & Taherzadeh, M. J. (2022). Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): A review. *Bioengineered*, 13(3), 6521–6557. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986>
- [5] Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (1996). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 50 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebauan.
- [6] Mefiana, R. M., et al. (2021). Uji efektivitas karbon aktif dan abu sekam padi dalam menurunkan kadar BOD dan COD limbah cair laundry. *Jurnal Kartika Kimia*, 4(2), 83–88.

- [7] Nishi, L., Ribeiro, A. C., Paraíso, C. M., Cusioli, D. A. G., Beltran, L. B., Cusioli, L. F., & Bergamasco, R. (2025). Low-cost adsorbents for water treatment: A sustainable alternative for pollutant removal. *Processes*, 13(12), 4088. <https://doi.org/10.3390/pr13124088>
- [8] Pachaiappan, R., Cornejo-Ponce, L., Rajendran, R., Manavalan, K., Rajan, V. F., & Awad, F. (2022). A review on biofiltration techniques: Recent advancements in the removal of volatile organic compounds and heavy metals in the treatment of polluted water. *Bioengineered*, 13(4), 8432–8477. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2050538>
- [9] Senanu, B. M., Boakye, P., Oduro-Kwarteng, S., Sewu, D. D., Awuah, E., Obeng, P. A., & Afful, K. (2021). Inhibition of ammonia and hydrogen sulphide as faecal sludge odour control in dry sanitation toilet facilities using plant waste materials. *Scientific Reports*, 11(1), 17803. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97016-w>
- [10] Setiawan, A. A., et al. (2022). Aplikasi kombinasi bahan pengisi biofilter zeolit alam untuk penyisihan emisi gas bau pada pengolahan sludge. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2), 135–142.
- [11] Sulistia, S., Charlena, & Ambarsari, H. (2021). Deodorisasi sludge limbah industri makanan untuk pakan maggot BSF (Black Soldier Fly) dengan teknik biosorpsi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(2), 222–230. <https://doi.org/10.29122/jtl.v22i2.4837>
- [12] Takarina, N. D., Chuan, O. M., Adiwibowo, A., & Adidharma, M. A. (2025). Modeling the shrimp aquaculture wastewater pollutant removals by clam shell using structural equation model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(1), 1–20.
- [13] Truschi, S., Rosi, L., Cenni, M., & Napoli, M. (2024). Application of biochar and natural adsorbents to anaerobic digestion versus digestate: Effects on emissions and C stability. *Science of The Total Environment*, 915, 170124.
- [14] Wang, X., Zhang, Y., & Zhao, Z. (2021). Environmental and health impacts of odor emissions from organic waste treatment. *Journal of Environmental Management*, 286, 112188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112188>
- [15] Yu, T., Chen, Z., Liu, Z., Xu, J., & Wang, Y. (2022). Review of hydrogen sulfide removal from various industrial gases by zeolites. *Separations*, 9(9), 229. <https://doi.org/10.3390/separations9090229>