

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Sludge* Industri Makanan

Sludge merupakan residu padat atau semi-padat yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah cair melalui sedimentasi, flotasi, maupun proses biologis di instalasi pengolahan air limbah (IPAL). *Sludge* terbentuk akibat akumulasi biomassa mikroorganisme, partikel organik tersuspensi, serta bahan terlarut yang mengalami presipitasi (Metcalf & Eddy, 2014).

Dalam industri makanan, *sludge* umumnya mengandung bahan organik tinggi berupa sisa karbohidrat, protein, dan lipid yang belum terdegradasi secara sempurna. Kandungan organik yang tinggi seperti protein, lemak, karbohidrat menggambarkan potensi biodegradabilitas dan nilai nutrisi *sludge* terutama pada industri penghasil produk makanan dan minuman (Rossi et al., 2023). Hal tersebut menyebabkan *sludge* memiliki nilai kadar padatan beserta fraksi tersuspensi yang mempengaruhi tekstur dan kelembaban *sludge* (Tchobanoglous et al., 2014).

2.1.1 Karakterisasi *Sludge*

Sludge industri makanan memiliki karakteristik yang kompleks, secara karakteristik fisiknya *sludge* meliputi kadar air (*moisture content*), warna, tekstur, dan bau. Kadar air yang tinggi (>70%) berkontribusi terhadap pembentukan kondisi anaerob (Kaushik & Sharma, 2020). Karakteristik kimia pada *sludge* sendiri meliputi pH, kandungan nitrogen amonia (NH₃), sulfida (H₂S), serta senyawa volatil lainnya. Proses degradasi protein menghasilkan amonia, sedangkan reduksi sulfat menghasilkan hidrogen sulfida (Zhang, 2022), sedangkan secara karakteristik biologis *sludge* didominasi mikroorganisme heterotrof dan anaerob yang berperan dalam fermentasi dan pembentukan senyawa volatil penyebab bau.

Kandungan nutrisi pada *sludge* industri makanan umumnya mengandung nitrogen (N), fosfor (P), dan karbon (C) dalam jumlah signifikan. Kandungan nutrisi ini menjadikannya berpotensi dan dapat dimanfaatkan sebagai substrat biomassa yang bernilai jual. Pemanfaatan menjadi bahan baku kompos, pupuk organik, maupun media

biokonversi larva *Black Soldier Fly* (BSF) (Kusumah et al, 2025). Namun demikian, potensi ini bergantung pada stabilitas biologis dan rendahnya kandungan senyawa toksik maupun senyawa volatil penyebab bau seperti CH_3 dan H_2S . Bau pada *sludge* tersebut disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme anaerob yang menghasilkan senyawa volatil seperti NH_3 , H_2S , asam lemak volatil (VFA), dan amina (Zhang, 2022). Senyawa ini memiliki ambang penciuman rendah sehingga dapat terdeteksi pada konsentrasi kecil.

2.1.2 Permasalahan Pengolahan *Sludge* Industri Makanan

Permasalahan utama pengelolaan *sludge* industri makanan meliputi volume yang besar, bau menyengat, serta potensi pencemaran lingkungan. Bau yang dihasilkan sering kali menimbulkan keluhan masyarakat di sekitar fasilitas IPAL, terutama ketika emisi bau menyebar hingga area permukiman atau ruang publik. Kondisi ini menunjukkan bahwa bau bukan sekadar isu kenyamanan, melainkan indikator pengelolaan *sludge* yang belum optimal (Wang et al., 2021)

2.2 Bau dan Senyawa Odor

Bau adalah respons sensorik yang menimbulkan sensasi akibat interaksi senyawa kimia ber-volatil berinteraksi dengan reseptor olfaktori manusia. Dalam konteks lingkungan, bau dipahami sebagai dampak dari keberadaan senyawa odor yang berisi senyawa volatil dan tekanan uap relatif tinggi sehingga mudah terlepas dari medium asalnya ke fase gas sehingga menimbulkan respon penciuman yang tidak nyaman bahkan gangguan kesehatan. Oleh karena itu bau yang ditimbulkan dalam pengelolaan limbah dan kualitas udara menjadi parameter penting yang perlu diperhatikan. Secara teknis, bau bukanlah satu parameter tunggal melainkan hasil dari campuran berbagai senyawa yang masing-masing memiliki ambang penciuman (odor *threshold*) yang berbeda-beda; persepsi bau dalam praktik lapangan merupakan hasil integratif dari konsentrasi relatif senyawa-senyawa tersebut dan interaksinya selama transport atmosferik (Zhang, 2021)

Konsep ambang penciuman (odor *threshold*) penting dalam penentuan apakah suatu emisi perlu ditindaklanjuti secara teknis atau regulatif. Ambang penciuman

didefinisikan sebagai konsentrasi minimum senyawa di udara yang dapat dideteksi oleh indera penciuman manusia yang sering didefinisikan pada persentil tertentu populasi 50% deteksi ahli (Capelli et al., 2021). Karena setiap senyawa odor memiliki ambang penciuman yang berbeda, beberapa senyawa dapat menimbulkan bau yang jelas meski hadir pada konsentrasi yang sangat rendah, sementara senyawa lain membutuhkan konsentrasi lebih tinggi untuk terdeteksi (Hernández et al., 2021).

Secara kebijakan di Indonesia, pendekatan untuk penilaian kebauan mengacu pada konsep baku tingkat kebauan yakni Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 50 Tahun 1996 masih menjadi rujukan utama untuk baku tingkat kebauan dengan penekanan pada parameter senyawa tertentu (termasuk NH_3 dan H_2S) sebagai indikator kebauan yang dapat diukur secara kuantitatif. Mengaitkan pengukuran kimiawi dengan indikator perseptual seperti intensitas bau memungkinkan penilaian yang lebih objektif atas keberhasilan upaya pengendalian bau.

2.2.1 Senyawa Penyebab Bau pada Limbah Organik

Bau pada limbah organik, termasuk *sludge* industri makanan, berasal dari senyawa volatil hasil degradasi bahan organik. Senyawa utama penyebab bau meliputi amonia (NH_3), hidrogen sulfida (H_2S), asam lemak volatil (VFA), dan amina. Senyawa-senyawa tersebut terbentuk selama proses biodegradasi anaerob protein, lemak, dan senyawa sulfur. Meskipun berbagai senyawa berkontribusi terhadap bau, penelitian ini membatasi fokus pada NH_3 dan H_2S karena relevansi regulatif, dampak lingkungan, serta kemudahan pengukuran kuantitatif (Zhang et al., 2021). Pada Tabel 2.1 dapat dilihat pada senyawa penyebab bau memiliki rumus kimia dan karakteristik bau nya masing.

Tabel 2.1 Senyawa Volatil Penyebab Bau pada Limbah Organik

No	Senyawa	Rumus Kimia	Ciri Khas Bau
1.	Amonia	NH_3	Menyengat, tajam
2.	Hidrogen Sulfida	H_2S	Telur Busuk

No	Senyawa		Rumus Kimia	Ciri Khas Bau
3.	Asam lemak volatil (VFA)	Asam asetat	CH_3COOH	Asam/cuka
		Asam propionat	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$	Asam tengik
4.	Amina	Putresin	$\text{C}_4\text{H}_{12}\text{N}_2$	Bangkai/busuk
		Kadaverin	$\text{C}_5\text{H}_{14}\text{N}_2$	
		Trimetilamina	$(\text{CH}_3)_3\text{N}$	Amis

(Sumber : Review of internationally proposed critical levels for ammonia, 2022)

2.2.2 Amonia (NH_3)

Amonia (NH_3) merupakan salah satu senyawa volatil utama penyebab bau pada limbah organik, khususnya pada *sludge* industri makanan yang memiliki kandungan protein tinggi. Secara kimia, amonia adalah gas bersifat basa dan mudah menguap, yang terbentuk dari proses deaminasi asam amino serta hidrolisis senyawa nitrogen organik selama degradasi biologis bahan organik. Dalam sistem pengolahan limbah, nitrogen protein terlebih dahulu terkonversi menjadi ion amonium (NH_4^+), yang selanjutnya dapat berada dalam kesetimbangan dengan amonia bebas (NH_3) tergantung pada pH dan suhu lingkungan (Zhang et al., 2022).

Volatilitas amonia meningkat pada kondisi pH basa dan suhu tinggi, sehingga *sludge* dengan pH relatif tinggi cenderung menghasilkan emisi NH_3 yang lebih besar. Kondisi ini umum dijumpai pada unit pengolahan *sludge* yang mengalami akumulasi bahan organik dan keterbatasan aerasi. Amonia memiliki bau menyengat yang khas dan mudah terdeteksi oleh indera penciuman manusia, sehingga sering menjadi sumber utama keluhan bau di sekitar instalasi pengolahan limbah organik (Li et al., 2021).

Dari sisi regulatif, amonia ditetapkan sebagai salah satu parameter kebauan di Indonesia melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 50 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebauan, dengan nilai ambang batas tertentu untuk menjaga kenyamanan lingkungan. Selain itu, berbagai pedoman internasional juga menempatkan amonia sebagai indikator penting dalam pengendalian bau dan kualitas udara karena kontribusinya terhadap iritasi saluran pernapasan dan pembentukan partikel sekunder di atmosfer (WHO, 2021).

2.2.3 Hidrogen Sulfida (H_2S)

Hidrogen sulfida (H_2S) merupakan senyawa gas berbau khas telur busuk yang dikenal sebagai salah satu penyebab bau paling dominan pada limbah organik. Senyawa ini bersifat sangat volatil, memiliki ambang penciuman yang sangat rendah, serta bersifat toksik dan korosif. Dalam sistem pengolahan limbah, H_2S terbentuk terutama melalui aktivitas bakteri pereduksi sulfat yang menguraikan senyawa sulfur organik dalam kondisi anaerob, seperti yang sering terjadi pada *sludge* yang mengalami penumpukan dan kekurangan oksigen (Hernández et al., 2021).

Pembentukan H_2S berkaitan erat dengan degradasi asam amino yang mengandung sulfur, seperti sistein dan metionin. Pada kondisi anaerob yang stabil, senyawa sulfur tereduksi menjadi sulfida terlarut yang kemudian dapat terlepas ke fase gas sebagai H_2S . Karena ambang penciumannya sangat rendah, keberadaan H_2S sering terdeteksi oleh masyarakat meskipun konsentrasinya relatif kecil, sehingga menimbulkan persepsi bau yang kuat dan tidak menyenangkan (Wang et al., 2021).

Selain berdampak pada kenyamanan, paparan H_2S pada konsentrasi tertentu juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, mulai dari iritasi mata dan saluran pernapasan hingga gangguan neurologis pada paparan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengendalian emisi H_2S menjadi aspek penting dalam pengelolaan limbah organik dan perlindungan kesehatan masyarakat di sekitar fasilitas pengolahan (Quist et al., 2024).

2.3 Deodorisasi Limbah Organik

Deodorisasi limbah organik adalah upaya untuk mengurangi atau menghilangkan bau yang dihasilkan dari limbah melalui pengendalian senyawa penyebab bau. Bau pada limbah organik umumnya berasal dari senyawa volatil seperti amonia (NH_3), hidrogen sulfida (H_2S), asam lemak volatil, dan amina yang terbentuk akibat degradasi bahan organik, terutama dalam kondisi anaerob. Keberadaan bau tidak hanya menjadi indikator ketidakstabilan proses pengolahan limbah, tetapi juga mencerminkan potensi dampak lingkungan dan kesehatan yang perlu dikendalikan secara teknis dan terukur (Capelli et al., 2021).

Tujuan utama deodorisasi adalah meningkatkan kualitas lingkungan dengan menekan emisi senyawa odor ke udara ambien, sehingga mengurangi gangguan kenyamanan bagi masyarakat sekitar. Selain itu, deodorisasi juga bertujuan menurunkan risiko gangguan kesehatan akibat paparan senyawa bau dan toksik terhadap lingkungan dan tubuh seperti gangguan pernafasan, sakit kepala dan gangguan fisiologis lainnya. Keberhasilan deodorisasi berperan penting dalam meningkatkan penerimaan sosial terhadap fasilitas pengelolaan limbah, terutama pada kawasan yang berdekatan dengan pemukiman penduduk (Czekaj et al., 2024).

Metode pengendalian bau meliputi diklasifikasikan menjadi metode fisik, kimia, dan biologis. Pemilihan metode bergantung pada karakteristik bau, kondisi limbah, serta aspek ekonomi dan keberlanjutan.

1. Metode Fisik (Adsorpsi)

Metode adsorpsi berlangsung dengan menangkap senyawa bau pada permukaan material penghasil bau melalui material berpori bermekanisme fisik. Mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 50 Tahun 1996 evaluasi efektivitas penurunan bau dapat dikaitkan dengan parameter NH_3 dan H_2S . Perlakuan cocok untuk langsung pada sumber (*in-situ*) dengan penambahan biochar dan adsorben yang sesuai dan cocok untuk mengadsorpsi kandungan senyawa odor penyebab bau dengan biaya yang relatif murah dan mudah dalam pengapliaksian pada *sludge*.

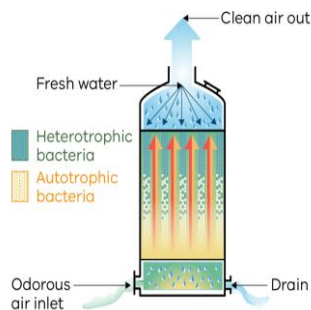
2. Metode Kimia

Metode kimia secara konsep adalah dengan melakukan penetralan dan oksidasi, mengubah senyawa bau menjadi bentuk yang kurang volatil atau berbahaya melalui reaksi kimia. Penggunaan alkali seperti kapur dan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai pengendali pH dan menurunkan volatilitas amoniak NH_3 dan turunan kimia bahaya lainnya. Oksidasi dengan oksidator seperti hidrogen peroksida atau senyawa besi juga menjadi opsi dalam senyawa odor dengan metode kimia (Wang et al., 2021).

Biaya dari proses penetralan dan oksidasi tergolong relatif tinggi dengan bahan kimia yang digunakan. Proses yang berlangsung berpotensi menghasilkan residu sekunder yang menimbulkan permasalahan lingkungan yang lain apabila penggunaan dosis yang tidak terkontrol dan ketat dalam pengaplikasiannya.

3. Metode Biologis

Mikroorganisme berperan penting dalam proses penurunan bau dengan metode biologis sebagai pendegradasi senyawa bau menjadi senyawa yang lebih stabil dan lebih aman dilepas pada lingkungan, biasa digunakan luas pada fasilitas pengolahan limbah dan IPAL skala besar (Capelli et al, 2021). Unit seperti biofilter berbahan kompos atau media organik biasa digunakan untuk mengurai H_2S dan biotrickling filter pada unit pengolahan udara buang



Gambar 2.1 *Bio-trickling filter*

Lahan dan waktu start-up menjadi keterbatasan yang sering dijumpai dalam penggunaan metode biologis dalam penurunan senyawa bau. *Sludge*

padat dalam skala kecil dinilai kurang praktis karena sensitif terhadap fluktuasi beban bau yang tidak menentu dari produksi terutama *sludge* industri makanan (Wang et al., 2021).

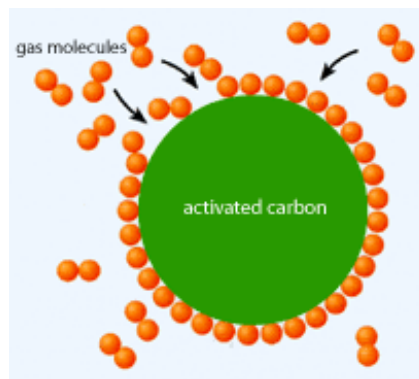
Pemilihan metode deodorisasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik bau yang dihasilkan, termasuk jenis senyawa penyebab bau, konsentrasi, dan pola emisinya. Selain itu, kondisi limbah seperti kadar air, pH, kandungan bahan organik, serta kondisi operasi fasilitas pengolahan juga menentukan efektivitas suatu metode (Wang et al., 2021). Dari sisi implementasi, aspek ekonomi dan keberlanjutan menjadi pertimbangan penting, terutama dalam skala industri, sehingga metode yang dipilih diharapkan memiliki biaya operasional rendah, mudah diaplikasikan, dan tidak menimbulkan dampak lingkungan sekunder.

Dalam konteks pengelolaan *sludge* industri makanan, metode adsorpsi dengan menggunakan material alami menjadi alternatif yang menarik karena bersifat sederhana, relatif murah, dan ramah lingkungan. Adsorpsi memungkinkan pengendalian bau dilakukan langsung pada sumbernya (in-situ) dengan memanfaatkan kemampuan material berpori untuk mengikat senyawa volatil seperti NH_3 dan H_2S . Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan dan ekonomi sirkular, terutama ketika adsorben yang digunakan berasal dari sumber alami atau limbah pertanian seperti sekam padi dan perikanan seperti cangkang kerang, sehingga memiliki nilai tambah dalam pengelolaan limbah terpadu dan mendukung prinsip pengolahan limbah berkelanjutan (Czekaj et al., 2024).

2.3.1 Teknik Adsorpsi dalam Proses Deodorisasi

Adsorpsi merupakan metode fisik yang memanfaatkan kemampuan permukaan adsorben untuk mengikat senyawa volatil. Proses adsorpsi terjadi ketika molekul gas atau zat terlarut, seperti amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S), berikatan dengan situs aktif pada permukaan adsorben melalui gaya fisika maupun interaksi kimia permukaan. Dalam konteks deodorisasi, adsorpsi berperan langsung dalam menurunkan konsentrasi senyawa penyebab bau di fase gas maupun pa

da media limbah, sehingga mengurangi intensitas bau yang terlepas ke lingkungan (Capelli et al., 2021). Keunggulan teknik ini adalah kemudahan aplikasinya pada berbagai skala pengolahan, mulai dari skala laboratorium hingga industri, biaya relatif rendah, serta efektivitasnya terhadap berbagai senyawa bau, termasuk NH_3 dan H_2S . Adsorpsi tidak memerlukan peralatan yang kompleks dan dapat diaplikasikan secara langsung pada sumber bau, seperti *sludge*, dengan metode pencampuran (*batch*). Selain itu, penggunaan adsorben alami menjadikan teknik ini relatif ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan metode kimia atau biologis yang memerlukan kontrol operasi yang lebih ketat dan biaya operasional lebih tinggi (Czekaj et al., 2024).



Gambar 2.2 Proses Adsorpsi Molekul dengan Adsorben

Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia adsorben yang digunakan baik itu alami maupun buatan. Parameter penting yang menentukan kinerja adsorben meliputi luas permukaan spesifik, porositas, ukuran pori, serta kapasitas tukar ion. Adsorben dengan luas permukaan dan porositas tinggi memiliki lebih banyak situs aktif untuk mengikat molekul volatil, sehingga berpotensi memberikan efisiensi penurunan bau yang lebih besar. Pada adsorben tertentu, seperti zeolit, mekanisme adsorpsi juga melibatkan pertukaran ion, khususnya dalam penyerapan amonia dalam bentuk ion amonium (NH_4^+) (Murphy, 2023).

Waktu kontak antara adsorben dan media limbah juga merupakan faktor penting dalam proses adsorpsi. Waktu kontak menentukan sejauh mana proses adsorpsi berlangsung hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Pada waktu kontak yang

singkat, proses adsorpsi umumnya belum optimal karena belum seluruh situs aktif terisi. Sebaliknya, peningkatan waktu kontak memungkinkan molekul bau untuk berdifusi dan berikatan dengan permukaan adsorben secara lebih maksimal, sehingga menghasilkan penurunan konsentrasi senyawa odor yang lebih signifikan (Zhang et al., 2022). Dalam penerapannya pada deodorisasi *sludge* industri makanan, teknik adsorpsi dipandang sebagai metode yang efektif untuk mengendalikan bau tanpa mengubah struktur dasar media secara drastis.

Penurunan konsentrasi senyawa odor penyebab bau seperti NH_3 dan H_2S melalui adsorpsi menunjang kualitas *sludge* dapat ditingkatkan sehingga lebih stabil dan layak dimanfaatkan lebih lanjut, misalnya sebagai substrat biokonversi oleh larva Black Soldier Fly (BSF). Oleh karena itu, teknik adsorpsi menjadi pendekatan yang relevan dan strategis dalam penelitian ini, baik dari sisi teknis maupun keberlanjutan pengelolaan limbah (Czekaj et al., 2024).

2.4 Adsorben Alami untuk Pengendalian Bau

Adsorben alami adalah material berbasis mineral atau biomassa yang memiliki kemampuan mengikat senyawa tertentu tanpa proses sintesis kompleks. Penggunaan adsorben alami dalam pengendalian bau limbah organik semakin banyak dikembangkan karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif rendah, serta dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan adsorben sintetis dan mendukung prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan. Pada proses deodorisasi *sludge* industri makanan, adsorben alami berperan sebagai media penyerap senyawa volatil penyebab bau, terutama amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S), yang terbentuk selama degradasi bahan organik (Capelli et al., 2021).

Pemilihan adsorben alami dalam penelitian ini didasarkan pada kesesuaian sifat fisik dan kimia adsorben terhadap karakteristik senyawa bau yang ditargetkan. NH_3 dan H_2S merupakan molekul kecil dengan sifat polar dan reaktif terhadap permukaan bermuatan, sehingga adsorben dengan porositas tinggi, luas permukaan besar, serta kemampuan pertukaran ion atau penyangga pH menjadi lebih efektif (Czekaj et al., 2024). Oleh karena itu, zeolit, sekam padi, dan kalsium karbonat (CaCO_3) dari

cangkang kerang dipilih sebagai material adsorben yang memiliki mekanisme penyerapan berbeda namun saling melengkapi

Kombinasi adsorben tersebut juga berpotensi menghasilkan efek sinergis melalui penggabungan mekanisme adsorpsi fisik dan penetralan kimia. Hal ini menjadi dasar pemilihan variasi perlakuan dalam penelitian ini.

2.4.1 Zeolit

Zeolit adalah mineral kristal mikropori dari aluminosilikat terhidrasi dan berpori dengan kapasitas tukar kation tinggi yang efektif mengikat gas volatil. Karakteristik utama zeolit adalah luas permukaan spesifik yang tinggi serta kapasitas tukar kation (KTK) yang besar. Sifat ini menjadikan zeolit sangat efektif dalam mengadsorpsi amonia melalui mekanisme pertukaran ion antara NH_4^+ dan kation penyeimbang dalam struktur zeolit (Murphy, 2023). Selain amonia, zeolit juga memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi hidrogen sulfida melalui adsorpsi fisik pada permukaan pori. Keberadaan struktur pori yang luas memberikan kontribusi cukup dalam menurunkan konsentrasi H_2S di fase gas seiring pada waktu kontak yang diberikan (Zhang et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa zeolit alami, khususnya tipe klinoptilolit, efektif menurunkan konsentrasi senyawa odor penyebab bau pada limbah organik dan sistem pengolahan *sludge*, sehingga sering digunakan sebagai adsorben utama dalam studi pengendalian bau.



Gambar 2.3 Bentuk Zeolit

Keunggulan zeolit sebagai adsorben terletak pada stabilitas struktur, ketersediaan alami, serta kemampuannya digunakan kembali setelah regenerasi sederhana. Namun, efektivitas zeolit sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, kondisi

kelembaban, serta rasio pencampuran dengan media *sludge*. Oleh karena itu, variasi rasio zeolit terhadap *sludge* menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian ini.

2.4.2 Sekam Padi sebagai Adsorben Alami

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang dihasilkan dalam jumlah besar dari proses penggilingan padi. Secara kimia, sekam padi tersusun atas selulosa, hemiselulosa, lignin, dan kandungan silika yang cukup tinggi. Struktur ini memberikan karakter berpori yang memungkinkan sekam padi berfungsi sebagai adsorben alami terhadap berbagai senyawa volatil (Nguyen et al., 2023). Mekanisme adsorpsi sekam padi terhadap senyawa bau terutama berlangsung melalui adsorpsi fisik pada permukaan dan pori-pori material.

Senyawa volatil seperti NH_3 dan H_2S dapat terperangkap di dalam struktur pori sekam padi, terutama ketika material berada dalam kondisi kering atau semi-kering. Meskipun kapasitas adsorpsinya lebih rendah dibandingkan adsorben mineral seperti zeolit, sekam padi tetap memberikan kontribusi signifikan dalam menurunkan bau (Nguyen et al., 2023). Selain fungsi adsorptif, sekam padi berperan sebagai bahan pembenah fisik media *sludge*. Penambahan sekam padi dapat meningkatkan porositas dalam *sludge*, sehingga mengurangi kondisi anaerob lokal yang mendukung pembentukan H_2S . Dengan demikian, sekam padi tidak hanya bekerja sebagai adsorben pasif, tetapi juga mempengaruhi lingkungan mikro tempat terbentuknya senyawa bau (Zhang et al., 2021).



Gambar 2.4 Biochar Sekam Padi

Keunggulan sekam padi terletak pada ketersediaannya yang melimpah, biaya rendah, serta sifat biodegradable. Namun, variasi sifat fisik sekam padi akibat perbedaan sumber dan perlakuan awal dapat mempengaruhi efektivitas adsorpsi. Oleh

karena itu, standarisasi perlakuan awal sekam padi menjadi biochar penting dalam menunjang penelitian. Dalam penelitian ini, sekam padi digunakan sebagai adsorben pendukung yang diuji baik secara tunggal maupun dalam kombinasi dengan adsorben lain. Perannya diharapkan dapat memperkuat efektivitas deodorisasi melalui mekanisme adsorpsi fisik dan perbaikan kondisi media *sludge*.

2.4.3 Kalsium Karbonat dari Cangkang Kerang

Cangkang kerang merupakan suatu limbah perikanan yang sering dijumpai di wilayah pesisir dan jarang diperhatikan. Kandungan yang ada pada cangkang kerang ini memiliki banyak zat penyusun yang dapat dimanfaatkan, salah satunya adalah kalsium karbonat (CaCO_3) yang merupakan senyawa mineral yang banyak ditemukan pada cangkang kerang dan organisme laut lainnya. Material ini bersifat basa dan memiliki kemampuan sebagai penyangga pH, sehingga banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah untuk menstabilkan kondisi kimia media (Takarina et al., 2024).



Gambar 2.5 Limbah Cangkang Kerang di Pesisir Pantai

Dalam sistem *sludge* industri makanan, pH memegang peranan penting dalam pembentukan dan pelepasan senyawa bau. Volatilitas amonia meningkat pada pH tinggi, sementara pembentukan H_2S dipengaruhi oleh kondisi anaerob dan keasaman media. Dengan menambahkan CaCO_3 , fluktuasi pH dapat dikendalikan sehingga pelepasan senyawa bau dapat ditekan secara tidak langsung (Li et al., 2021). Kalsium karbonat (CaCO_3) bukan adsorben berpori seperti zeolit, material ini dapat berinteraksi dengan senyawa asam dan senyawa sulfur melalui reaksi kimia sederhana. Interaksi tersebut dapat menurunkan aktivitas senyawa bau atau mengubahnya menjadi bentuk yang kurang volatil dan lebih sederhana.

Oleh karena itu kalsium karbonat (CaCO_3) berfungsi sebagai agen pendukung dalam proses deodorisasi (Takarina et al., 2024). Penggunaan CaCO_3 dari cangkang kerang memiliki keunggulan dalam segi pemanfaatan limbah padat sebagai sumber material bernilai guna. Pendekatan ini mendukung prinsip pengelolaan limbah terpadu dan pengurangan residu. Selain itu, CaCO_3 relatif aman, mudah diaplikasikan, dan tidak menghasilkan produk samping berbahaya dan memiliki nilai ekonomis (Takarina et al., 2024). Dalam penelitian ini, CaCO_3 digunakan sebagai adsorben pendamping yang diuji baik secara tunggal maupun kombinasi. Perannya difokuskan pada stabilisasi pH dan pengendalian kondisi lingkungan yang mendukung terbentuknya senyawa bau, sehingga melengkapi mekanisme adsorpsi fisik dari adsorben lainnya.

2.5 *Black Soldier Fly (BSF)*

BSF (*Hermetia illucens*) dikenal sebagai agen biokonversi limbah organik yang efisien. Pertumbuhan larva dipengaruhi oleh kualitas media, termasuk bau, kandungan nutrisi, dan stabilitas kimia. *Sludge* yang telah mengalami deodorisasi diharapkan memberikan lingkungan tumbuh yang lebih optimal bagi larva BSF (Rossi et al., 2023). Larva BSF mampu mendegradasi berbagai jenis limbah organik, termasuk limbah makanan, limbah pertanian, dan *sludge* hasil pengolahan limbah.

Proses biokonversi ini menghasilkan dua produk utama, yaitu biomassa larva yang kaya protein dan lemak serta residu frass yang lebih stabil secara biologis. Oleh karena itu, BSF dipandang sebagai solusi inovatif dalam pengelolaan limbah organik berbasis prinsip ekonomi sirkular (Mishra et al., 2023). Keberhasilan biokonversi oleh BSF sangat dipengaruhi oleh kualitas media tumbuh larva. Media yang tidak stabil, mengandung senyawa toksik, atau memiliki bau menyengat dapat menghambat aktivitas makan larva dan menurunkan tingkat kelangsungan hidupnya. Senyawa bau seperti amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S) diketahui dapat memberikan tekanan fisiologis pada larva apabila berada pada konsentrasi tinggi (Lalander et al., 2021).

Sludge industri makanan memiliki potensi sebagai substrat BSF karena kandungan bahan organik dan nutriennya yang tinggi. Namun, bau menyengat yang dihasilkan *sludge*, terutama akibat NH_3 dan H_2S , menjadi kendala utama

pemanfaatannya secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan proses pendahuluan berupa deodorisasi untuk meningkatkan kualitas *sludge* sebagai media tumbuh larva BSF juga digunakan sebagai indikator biologis untuk mengevaluasi keberhasilan proses deodorisasi *sludge*. *Sludge* yang telah mengalami penurunan bau dan senyawa odor diharapkan memberikan lingkungan tumbuh yang lebih optimal, yang tercermin dari peningkatan berat larva, panjang larva, dan *survival rate* dibandingkan dengan *sludge* tanpa perlakuan.

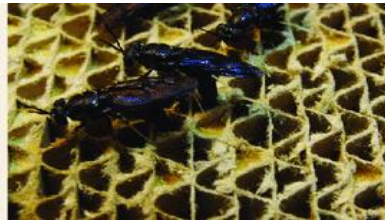
2.5.1 Biologi dan Siklus Hidup Black Soldier Fly

Black Soldier Fly memiliki siklus hidup yang kompleks seiring berlangsungnya hidup. Setiap fase hidup memiliki karakteristik biologis dan fungsi ekologis yang berbeda, terutama terkait dengan konsumsi bahan organik dan reproduksi. Pemahaman terhadap siklus hidup BSF menjadi dasar penting dalam pemanfaatannya sebagai agen biokonversi limbah organik (Lalander et al., 2021) yang dimana terdiri dari beberapa fase:

1. Fase Telur

Fase telur merupakan tahap awal siklus hidup BSF dan berperan penting dalam menentukan keberhasilan tahap selanjutnya. Lalat betina BSF umumnya meletakkan telur pada celah atau permukaan kering yang berdekatan dengan sumber bahan organik yang membusuk, namun tidak langsung bersentuhan dengan media basah. Strategi ini bertujuan melindungi telur dari kondisi anaerob dan kelebihan kelembaban yang dapat menghambat penetasan (Rossi et al., 2023). Telur BSF berbentuk lonjong berwarna putih kekuningan dengan ukuran sangat kecil yang dapat berjumlah ratusan butir.

Dalam kondisi lingkungan yang optimal, seperti suhu 27–30 °C dan kelembaban relatif yang cukup, telur BSF menetas dalam waktu sekitar 3–4 hari. Lama penetasan ini relatif konsisten pada berbagai penelitian, menjadikan fase telur sebagai tahap yang mudah diprediksi secara temporal (Lalander et al., 2021).



Gambar 2.6 Lalat Betina yang Sedang Bertelur

(Sumber : Samuel Blyth, 2017)

2. Fase Larva (5 DOL / Maggot)

Fase larva merupakan tahap paling krusial dalam siklus hidup BSF karena pada fase inilah konsumsi bahan organik terjadi secara intensif. Larva BSF bersifat saprofag dan mampu mengkonsumsi berbagai jenis bahan organik, termasuk limbah makanan dan *sludge* hasil pengolahan limbah. Aktivitas makan yang tinggi menjadikan fase larva sebagai fokus utama dalam aplikasi pengolahan limbah dan biokonversi (Rossi et al., 2023).

Singkatan untuk larva umur lima hari (Five-Day-Old-Larvae). Larva yang baru menetas, apabila dipelihara di lingkungan yang terkontrol dan terlindungi selama lima hari, larva telah melewati fase adaptasi awal dan menunjukkan kemampuan konsumsi substrat yang stabil, sehingga memudahkan penghitungan dan pengamatan pertumbuhan (Mishra et al., 2023).



Gambar 2.7 Larva Umur 5 hari

(Sumber : Melita Rini, 2009)

3. Prapupa

Fase prapupa merupakan tahap transisi antara larva dan pupa, ditandai dengan perubahan warna larva menjadi lebih gelap dan penurunan aktivitas makan. Pada tahap ini, larva berhenti mengonsumsi substrat dan mulai mempersiapkan diri untuk proses metamorfosis (Rossi et al., 2023). Pada fase prapupa, cadangan energi yang telah dikumpulkan selama fase larva digunakan untuk mendukung pembentukan struktur tubuh pupa. Oleh karena itu, kualitas dan kuantitas nutrisi yang diperoleh selama fase larva sangat menentukan keberhasilan transisi menuju fase pupa. Media tumbuh yang buruk pada fase larva dapat menyebabkan kegagalan perkembangan pada fase prapupa (Mishra et al., 2023).



Gambar 2.8 Fase Prapupa
(Sumber : Samuel Blyth, 2017)

4. Pupa

Fase pupa merupakan tahap metamorfosis pasif dimana organisme mengalami reorganisasi struktural secara internal. Pada fase ini, BSF tidak melakukan aktivitas makan dan seluruh kebutuhan energi diperoleh dari cadangan yang tersimpan selama fase larva (Rossi et al., 2023). Lama fase pupa bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembaban. Pada kondisi optimal, fase ini berlangsung selama 1–2 minggu sebelum imago keluar. Kondisi lingkungan yang tidak stabil dapat memperpanjang fase pupa atau menyebabkan kegagalan metamorfosis (Mishra et al., 2023).



Gambar 2.9 Fase Pupa
(Sumber : Sandec, 2017)

5. Imago (Lalat Dewasa)

Fase imago merupakan tahap akhir siklus hidup BSF yang berfungsi utama sebagai fase reproduksi. Lalat dewasa BSF tidak mengonsumsi bahan organik seperti fase larva, melainkan hanya membutuhkan air atau sumber energi minimal. Hal ini menjadikan BSF relatif aman dari sisi kesehatan lingkungan karena tidak berperan sebagai vektor penyakit (Lalander et al., 2021). Imago BSF memiliki umur relatif singkat, berkisar antara 5–8 hari, selama periode tersebut aktivitas utamanya adalah kawin dan bertelur. Keberhasilan reproduksi imago dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban (Rossi et al., 2023).



Gambar 2.10 Fase Imago BSF
(Sumber : Nandayure , 2017)

Dari seluruh tahapan tersebut, fase larva merupakan fase paling aktif dalam konsumsi bahan organik dan menjadi fokus utama dalam aplikasi pengolahan limbah. Telur BSF biasanya menetas dalam waktu 3–4 hari dan berkembang menjadi larva yang aktif mengonsumsi substrat selama 10–14 hari (Lalander et al., 2021).

Pada fase larva, BSF menunjukkan laju pertumbuhan yang sangat cepat dan kemampuan mendegradasi bahan organik yang tinggi. Larva mampu meningkatkan bobot tubuhnya hingga beberapa ribu kali lipat dari bobot awal, tergantung pada kualitas dan ketersediaan media pakan. Aktivitas metabolisme larva yang intensif menjadikan fase ini sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan media tumbuh (Mishra et al., 2023). Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan pH media mempengaruhi keberhasilan perkembangan larva BSF. Suhu optimal pertumbuhan larva umumnya berada pada kisaran 27–30 °C, sementara pH media yang terlalu ekstrim dapat menghambat aktivitas makan larva. Selain itu, keberadaan senyawa volatil beracun dalam media juga dapat mengganggu proses metabolisme larva (Lalander et al., 2021). Pemahaman terhadap biologi dan siklus hidup BSF menjadi dasar penting dalam merancang penelitian ini, khususnya dalam menentukan fase larva yang digunakan, lama pemeliharaan, serta parameter pertumbuhan yang diamati sebagai indikator keberhasilan pemanfaatan *sludge* ter-deodorisasi.

2.5.2 Pemanfaatan BSF dalam Pengolahan Limbah Organik

Pemanfaatan BSF dalam pengolahan limbah organik didasarkan pada kemampuannya dalam mengonversi bahan organik menjadi biomassa dengan efisiensi tinggi. BSF telah diaplikasikan pada berbagai jenis limbah organik, seperti sisa makanan, limbah pasar, limbah pertanian, hingga lumpur hasil pengolahan limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik limbah sangat mempengaruhi performa larva, baik dari segi pertumbuhan maupun tingkat kelangsungan hidup (Rossi et al., 2023).

Pemanfaatan BSF pada *sludge* industri masih menghadapi berbagai tantangan dan kendala, terutama terkait bau, kandungan senyawa toksik, dan stabilitas media. *Sludge* yang tidak diolah dengan baik dapat menurunkan aktivitas makan larva dan menyebabkan kematian larva dalam jumlah besar (Mishra et al., 2023). Oleh karena itu, pendekatan deodorisasi *sludge* sebelum digunakan sebagai media BSF menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa *sludge* memenuhi persyaratan biologis bagi pertumbuhan larva dan dapat dimanfaatkan secara aman dan efektif.

2.5.3 Pengaruh Kualitas Media terhadap Pertumbuhan Larva BSF

Media tumbuh larva BSF harus memenuhi beberapa kriteria agar larva dapat tumbuh dan berkembang secara optimal. Faktor fisik dan kualitas kimia media juga berperan penting. Konsentrasi amonia yang tinggi dapat bersifat toksik bagi larva dan mengganggu aktivitas makan. Oleh karena itu, pengendalian konsentrasi senyawa odor penyebab bau menjadi salah satu aspek penting dalam penyediaan media tumbuh yang layak (Li et al., 2021). Media dengan bau menyengat umumnya mencerminkan kondisi fermentasi yang tidak stabil dan keberadaan senyawa volatil berbahaya. Penurunan bau melalui proses deodorisasi diharapkan dapat meningkatkan palatabilitas media bagi larva (Capelli et al., 2021).

2.6 Pemanfaatan *Sludge* sebagai Media Tumbuh BSF

Penurunan bau dan senyawa odor pada *sludge* tidak hanya meningkatkan kenyamanan lingkungan, tetapi juga meningkatkan kelayakan *sludge* sebagai media tumbuh BSF. Penelitian ini menghubungkan efektivitas deodorisasi dengan performa pertumbuhan larva sebagai indikator keberhasilan pemanfaatan *sludge*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penurunan bau dan senyawa odor pada media dapat meningkatkan konsumsi substrat oleh larva BSF. Hal ini mengindikasikan bahwa bau tidak hanya berperan sebagai gangguan lingkungan, tetapi juga mempengaruhi perilaku makan larva secara langsung (Sulistia et al., 2021).

Dalam konteks penelitian ini, performa pertumbuhan larva BSF digunakan sebagai indikator keberhasilan akhir dari proses deodorisasi *sludge*. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi berat larva, panjang larva, dan *survival rate* sebagai representasi respons biologis larva terhadap kualitas media. Dengan begitu, hubungan antara penurunan konsentrasi NH_3 dan H_2S serta peningkatan performa larva BSF menjadi dasar evaluasi keterkaitan antara proses deodorisasi secara kimia dan keberhasilan biokonversi secara biologis dalam penelitian ini.

2.7 Faktor Efektivitas Adsorpsi

Efektivitas proses adsorpsi dalam deodorisasi limbah organik ditentukan oleh interaksi kompleks antara karakteristik adsorben, sifat media yang diolah, serta kondisi

operasi proses. Adsorpsi tidak hanya bergantung pada jenis material adsorben, tetapi juga pada rasio pencampuran, waktu kontak, dan kondisi lingkungan yang mempengaruhi dinamika interaksi antara adsorben dan senyawa volatil penyebab bau (Murphy, 2023). Dalam sistem *sludge* industri makanan, senyawa bau utama seperti amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S) memiliki sifat reaktif yang dipengaruhi oleh kondisi fisik-kimia media. Oleh karena itu, pengendalian faktor-faktor proses menjadi krusial untuk memastikan bahwa penurunan bau yang diamati benar-benar merupakan hasil dari mekanisme adsorpsi, bukan akibat fluktuasi lingkungan yang tidak terkontrol (Zhang et al., 2022).

Waktu kontak dengan variasi waktu 12, 24, dan 48 jam digunakan untuk mengevaluasi dinamika penurunan bau. Pendekatan kuantitatif terhadap efektivitas adsorpsi umumnya dilakukan dengan mengevaluasi efisiensi penurunan (% removal), kapasitas adsorpsi (q), serta laju adsorpsi (kinetika). Parameter-parameter ini memungkinkan perbandingan yang objektif antar perlakuan dan menjadi dasar analisis statistik untuk menentukan pengaruh signifikan dari faktor-faktor yang diuji (Murphy, 2023).

Dalam penelitian ini, efektivitas adsorpsi dikaji melalui variasi rasio adsorben terhadap *sludge*, waktu kontak adsorpsi, serta pengendalian kondisi lingkungan sebagai variabel tetap. Upaya mengendalikan faktor-faktor tersebut secara sistematis pada penelitian ini bertujuan memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi optimum deodorisasi *sludge* industri makanan menggunakan adsorben alami.

2.7.1 Rasio Adsorben terhadap *Sludge*

Rasio adsorben terhadap *sludge* merupakan faktor penting yang menentukan jumlah situs aktif adsorpsi yang tersedia dalam sistem. Semakin besar rasio adsorben, semakin banyak permukaan aktif yang dapat berinteraksi dengan senyawa volatil, sehingga secara teoritis meningkatkan kapasitas dan efisiensi adsorpsi (Murphy, 2023).

Dalam sistem *batch*, rasio adsorben yang terlalu rendah dapat menyebabkan keterbatasan situs aktif, sehingga penurunan konsentrasi NH_3 dan H_2S menjadi tidak optimal. Sebaliknya, penggunaan adsorben dalam jumlah berlebihan tidak selalu

menghasilkan peningkatan efisiensi yang sebanding dan dapat menimbulkan inefisiensi dari sisi ekonomi dan operasional (Zhang et al., 2022).

Penelitian terdahulu yang dilakukan (Sulistia et al., 2021) menunjukkan bahwa rasio adsorben terhadap media limbah perlu ditentukan secara empiris untuk setiap jenis adsorben dan karakteristik limbah sebagai contoh pada deodorisasi *sludge*, rasio 1:3 (adsorben:*sludge*) dan variasi kombinasi adsorben (1:1:3) sering digunakan sebagai titik awal untuk mengevaluasi efektivitas adsorpsi. Selain jumlah adsorben, homogenitas pencampuran juga mempengaruhi efektivitas rasio (Murphy, 2023). Distribusi adsorben yang merata dalam *sludge* memastikan bahwa senyawa bau memiliki peluang yang sama untuk berinteraksi dengan situs aktif adsorben, sehingga meningkatkan konsistensi hasil adsorpsi.

2.7.2 Waktu Kontak Adsorpsi

Waktu kontak menentukan laju difusi molekul volatil dari fase padat/*sludge* ke dalam permukaan dan pori adsorben dan akhirnya menuju kondisi kesetimbangan (Murphy, 2023). Pada awal kontak, laju adsorpsi tinggi karena banyak situs kosong; seiring waktu laju menurun ketika situs terisi dan difusi internal menjadi pembatas utama. Oleh karena itu, memilih titik pengukuran (12, 24, 48 jam) memungkinkan penelitian ini mengamati fase awal, menengah, dan mendekati kesetimbangan.

Bukti empiris pada adsorpsi NH_3 dan H_2S pada berbagai adsorben menunjukkan bahwa sebagian besar penurunan signifikan terjadi dalam 24 jam pertama, namun beberapa adsorben khusus atau kombinasi memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kesetimbangan penuh, terutama jika difusi intrapori lambat atau bila adsorpsi melibatkan reaksi permukaan kimiawi (Zulkefli et al., 2023). Dari sudut desain eksperimen, waktu kontak juga harus diseimbangkan dengan kebutuhan operasional; waktu yang terlalu lama mengurangi kemampuan pemrosesan dan menambah kebutuhan wadah serta periode penyimpanan, sedangkan waktu yang terlalu singkat mungkin tidak mencerminkan kemampuan penuh adsorben. Oleh karena itu, analisis harus menunjukkan *trade-off* antara efisiensi penghilangan dan durasi proses (Murphy, 2023).

Dalam penelitian ini, waktu kontak diperlakukan sebagai variabel bebas yang dianalisis bersama rasio adsorben. Analisis ini memungkinkan evaluasi pengaruh waktu terhadap penurunan bau serta interaksinya dengan rasio adsorben dalam menentukan efektivitas deodorisasi *sludge*.

2.7.3 Kondisi Lingkungan

Kondisi lingkungan, khususnya pH dan kadar air media, memiliki pengaruh signifikan terhadap volatilitas senyawa bau dan mekanisme adsorpsi. pH memengaruhi keseimbangan antara bentuk terlarut dan volatil dari amonia, dimana peningkatan pH cenderung meningkatkan fraksi NH_3 bebas yang mudah menguap (Li et al., 2021).

Kadar air media juga berperan penting dalam proses adsorpsi. Media yang terlalu kering dapat membatasi difusi senyawa bau menuju permukaan adsorben, sementara media yang terlalu basah dapat menciptakan kondisi anaerob yang mendukung pembentukan H_2S serta mengurangi efektivitas adsorpsi fisik (Zhang et al., 2021). Dalam konteks deodorisasi *sludge*, pengendalian pH dan kadar air diperlukan untuk memastikan bahwa perubahan konsentrasi NH_3 dan H_2S yang diamati benar-benar disebabkan oleh proses adsorpsi, bukan oleh perubahan kondisi lingkungan yang tidak terkendali (Murphy, 2023).

Oleh karena itu, pH dan kadar air dalam penelitian ini dikendalikan sebagai variabel tetap. Penyeragaman kondisi lingkungan dilakukan sebelum dan selama proses adsorpsi untuk meminimalkan variabilitas data dan meningkatkan validitas hasil penelitian (Czekaj et al., 2024). Pengendalian kondisi lingkungan juga penting untuk menjamin keterkaitan antara hasil deodorisasi dan tahap lanjutan penelitian, yaitu pemanfaatan *sludge* sebagai media tumbuh larva BSF. Media dengan pH dan kadar air yang stabil diharapkan lebih layak secara biologis bagi pertumbuhan larva.

2.8 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Tabel 2.2 Ringkasan Hasil Penelitian Sebelumnya

No	Nama dan Tahun Penelitian	Penelitian	Fokus & Variabel Utama	Metode Penelitian dan Temuan Utama
1	Sulistia et al. (2022)	Deodorisasi <i>sludge</i> limbah industri makanan dengan teknik biosorpsi	Rasio biosorben alami (PKN, kompos, CaCO_3) untuk menurunkan bau, N-amonia, dan sulfida pada <i>sludge</i> serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan larva BSF	Penelitian ini menguji penggunaan biosorben alami pupuk kandang (PKN), kompos (K), dan kalsium karbonat (Ca) untuk menurunkan bau, konsentrasi amonia dan sulfida pada <i>sludge</i> industri es krim serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap pertumbuhan maggot Black Soldier Fly. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi K:Ca: <i>Sludge</i> pada rasio 1:1:3 paling efektif dalam menurunkan bau, NH_3 , dan H_2S , sementara rasio PKN:K: <i>Sludge</i> 1:1:3 memberikan pertumbuhan BSF terbaik dalam hal jumlah dan ukuran larva. Hasil : Rasio K:Ca: <i>Sludge</i> 1:1:3 efektif menurunkan bau, NH_3 , H_2S . Namun rasio PKN:K: <i>Sludge</i> 1:1:3 memberi pertumbuhan larva BSF terbaik.
2	Ambarsari et al. (2023)	<i>The effectiveness of coconut shell charcoal and activated carbon on deodorization of sludge from ice</i>	Uji adsorben (arang sekam kelapa & karbon aktif) pada <i>sludge</i> industri untuk mereduksi bau, NH_3 & sulfida dengan variasi rasio media	Penelitian ini membandingkan karbon aktif dan arang sekam kelapa sebagai adsorben untuk mereduksi bau, NH_3 , dan H_2S pada <i>sludge</i> limbah industri es krim. Hasil uji menunjukkan bahwa karbon aktif dengan rasio 1:3 mampu menurunkan bau secara lebih efektif dibanding

No	Nama dan Tahun Penelitian	Penelitian	Fokus & Variabel Utama	Metode Penelitian dan Temuan Utama
		<i>cream industry WWTP</i>		arang sekam kelapa. Data ini penting sebagai pembanding alternatif adsorben dalam penelitian deodorisasi <i>sludge</i> . Hasil : Activated carbon menunjukkan penurunan bau terbaik dengan rasio 1:3, sedangkan arang sekam kelapa juga menurunkan NH_3 dan H_2S secara signifikan dibanding kontrol.
3	Norgren et al. (2023)	<i>Bio-sludge from pulp & paper wastewater fermented as feed for BSFL</i>	Pemanfaatan <i>bio-sludge</i> terfermentasi sebagai media pakan BSF dengan fokus pada nutrisi, pertumbuhan dan survival	Studi pada <i>bio-sludge</i> hasil pengolahan limbah pulp & paper menunjukkan bahwa fermentasi meningkatkan ketersediaan nutrisi untuk larva BSF, namun tidak selalu meningkatkan <i>survival rate</i> . Temuan ini menegaskan bahwa <i>pretreatment</i> media (mis. deodorisasi dalam studi Anda) dapat mempengaruhi kualitas media BSF. Hasil : Fermentasi meningkatkan ketersediaan nutrisi tetapi survival BSF lebih rendah dibanding media lain, menunjukkan bahwa <i>pretreatment</i> penting sebelum BSF.
4	Albalawneh et al. (2025)	<i>Influence of Sludge and Feed Mixtures on Metal Retention</i>	Analisis substrat campuran <i>sludge</i> + feed pada perkembangan BSF (nutrisi, logam berat, patogen)	Penelitian ini mengevaluasi campuran <i>sludge</i> dan pakan tradisional terhadap retensi logam berat, nutrisi, dan reduksi patogen selama

No	Nama dan Tahun Penelitian	Penelitian	Fokus & Variabel Utama	Metode Penelitian dan Temuan Utama
		<i>in BSF Larvae Systems</i>		biokonversi oleh BSF. Hasil menunjukkan bahwa komposisi media sangat mempengaruhi performa larva dan output nutrisi, mendukung argumen bahwa peningkatan kualitas media lewat deodorisasi dapat berdampak positif terhadap pertumbuhan BSF Hasil : Komposisi substrat mempengaruhi efisiensi biokonversi limbah dan kualitas larva; menunjukkan pentingnya karakter media
5	Albalawneh et al. (2025)	<i>Feeding BSF Larvae Using Wastewater Treatment Sludge (2025)</i>	Penggunaan <i>sludge</i> hasil elektrokoagulasi/flokulasi sebagai pakan BSF	Studi terbaru fokus pada penggunaan <i>sludge</i> dari limbah egg-washing dan poultry slaughterhouse yang di pretreat sebelum menjadi pakan BSF. Hal ini relevan karena menunjukkan prosedur <i>pretreatment</i> lainnya yang meningkatkan kelayakan <i>sludge</i> sebagai substrat BSF dan relevan untuk justifikasi mengapa <i>deodorisasi</i> perlu diuji. Hasil : <i>Sludge</i> hasil <i>pretreatment</i> layak sebagai pakan BSF L dengan parameter optimum pH & TS yang dibutuhkan untuk pertumbuhan

(Sumber : Penulis, 2026)