

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah Cair

A.1 Pengertian Limbah Cair

Limbah cair (*wastewater*), secara definitif adalah air sisa yang dihasilkan dari berbagai rangkaian aktivitas manusia, baik yang berasal dari skala domestik rumah tangga, komersial perkantoran, restoran, maupun skala industrial pabrik. Air sisa ini telah mengalami perubahan dasar, baik secara fisik, kimia, maupun biologi, yang menyebabkan penurunan kualitas secara drastis sehingga tidak lagi memenuhi standar baku mutu kesehatan maupun lingkungan (Hung et al., 2021).

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, air limbah dikategorikan sebagai air sisa dari usaha dan kegiatan yang memiliki potensi signifikan untuk mencemari lingkungan. Kandungan polutan di dalamnya sangat beragam, mencakup bahan organik terlarut dan tersuspensi, senyawa anorganik seperti logam berat dan nutrisi, serta mikroorganisme patogen, yang semuanya jika dilepas ke badan air penerima tanpa pengolahan yang memadai akan memicu kerusakan ekosistem, kontaminasi sumber daya air, dan peningkatan risiko penyakit berbasis air (*waterborne diseases*) pada masyarakat di kampung Listrik Bawah Jalan Listrik Atas Sempajaya, Kecamatan Berastagi, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatra Utara (Ash & Ash, 2024).

A.2 Limbah Cair Domestik

Limbah cair domestik adalah seluruh limbah cair yang bersumber dari aktivitas permukiman atau rumah tangga. Limbah domestik ini secara umum diklasifikasikan menjadi dua kategori utama: *black water* (air hitam) yang merujuk spesifik pada limbah dari buangan toilet mengandung feces dan urin, dan *grey water* (air kelabu) yang mencakup seluruh limbah non-toilet. Penelitian ini secara khusus berfokus pada *grey water*, karena yang tinggi di mana *grey water* menyumbang bagian volume terbesar dari total limbah domestik, diperkirakan mencapai 60% hingga 70% dari total

konsumsi air bersih per kapita. Ironisnya, volume yang besar-besaran ini sering kali tidak diimbangi dengan sistem pengolahan yang layak dan langsung dibuang ke saluran drainase atau badan air, menjadikannya kontributor utama pencemaran di wilayah permukiman padat (Farhan et al., 2023).

Sumber *grey water* sangat bervariasi, namun dapat dikelompokkan menjadi tiga sumber utama. Pertama adalah dapur (*kitchen*), yang berasal dari air sisa pencucian peralatan makan, bahan makanan (sayur, daging), dan minyak goreng. Sumber ini menjadi penyumbang utama senyawa organik kompleks, minyak, dan lemak yang sulit terdegradasi. Kedua adalah binatu (*laundry*), yang berasal dari aktivitas pencucian pakaian, baik secara manual maupun menggunakan mesin cuci. Sumber ini kaya akan senyawa kimia sintetis seperti deterjen (*surfaktan*, LAS), fosfat sebagai *builder* deterjen, pemutih (*klorin*), dan pewangi. Ketiga adalah kamar mandi, yang berasal dari air sisa mandi (sabun, sampo) dan *wastafel* (pasta gigi, sabun cuci tangan), yang menyumbang bahan organik terlarut dan surfaktan (Khotimah et al., 2021).

Karakteristik *grey water* bersifat sangat *heterogen* (tidak seragam) dan *fluktuatif* (berubah-ubah), bergantung pada pola hidup, status sosial ekonomi, dan produk pembersih yang digunakan oleh rumah tangga (Puspitasari, 2022). Secara fisik, *grey water* umumnya berwarna keruh, memiliki *turbiditas* (kekeruhan) tinggi akibat padatan tersuspensi (TSS), dan sering kali berbau akibat dekomposisi parsial bahan organik. Secara kimia, karakteristik utamanya adalah memiliki pH yang cenderung basa (*alkalis*) sebagai dampak dari penggunaan sabun dan deterjen. Kandungan utamanya adalah bahan organik yang tinggi, yang diindikasikan dengan nilai *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang melampaui baku mutu. Selain itu, *grey water* kaya akan nutrisi, terutama Fosfat dari deterjen dan Nitrogen dari sisa makanan, yang berpotensi memicu *eutrofikasi* (masalah pencemaran air). Kandungan surfaktan juga penting, yang dapat menurunkan tegangan permukaan air dan toksik bagi biota. Secara biologi, meski tidak sekoncentrat *black water*, *grey*

water tetap mengandung mikroorganisme, termasuk bakteri patogen seperti *Escherichia coli* dan *Total Coliform* (Budeli, 2025).

A.3 Sumber Air Limbah

Sumber air limbah dibagi menjadi 3 yaitu (Ekoputri et al., 2024):

1. Air Limbah rumah tangga

Air limbah rumah tangga adalah seluruh buangan cair yang berasal dari aktivitas harian di lingkungan permukiman atau rumah tangga. Seperti yang telah diuraikan, limbah ini mencakup *black water* buangan toilet yang kaya patogen dan nitrogen dan *grey water* buangan non-toilet seperti air bekas cuci piring, mandi, dan pakaian.

2. Air Limbah Komersial

Air limbah komersial limbah ini bersumber dari kawasan niaga atau tempat-tempat usaha yang menyediakan jasa bagi publik. Contohnya restoran, hotel, pasar swalayan, perkantoran, dan usaha binatu (*laundry*). Karakteristiknya sering kali mirip dengan limbah domestik, namun cenderung memiliki konsentrasi polutan tertentu yang lebih pekat, misalnya kandungan minyak dan lemak (*Fats, Oils, and Grease* - FOG) yang sangat tinggi dari dapur restoran, atau deterjen (fosfat dan surfaktan) dari *laundry*.

3. Air Limbah Industri

Air limbah industri ini adalah air buangan yang dihasilkan dari serangkaian proses produksi di pabrik atau kawasan manufaktur. Sifat dan kandungan limbah ini sangat bervariasi dan bersifat sangat spesifik, tergantung pada jenis industri dan bahan baku yang digunakan. Limbah industri sering kali mengandung polutan anorganik, senyawa kimia sintetis, atau logam berat seperti merkuri, timbal, atau kromium yang bersifat beracun dan sulit diurai secara alami (*non-biodegradable*).

A.4 Karakteristik Limbah Cair Domestik

Berikut adalah karakteristik limbah cair domestik (Mega & Setiadi, 2022):

1. Karakteristik Fisik

Karakteristik fisik ini sifat-sifat limbah yang dapat dideteksi secara fisik. Parameter utamanya meliputi suhu, yang biasanya sedikit lebih hangat dari pada air bersih akibat aktivitas mandi atau mencuci. Selain itu, terdapat warna dan bau, yang timbul akibat pembusukan bahan organik atau sisa sabun. Parameter fisik penting lainnya adalah padatan, yang terbagi menjadi *Total Suspended Solids* (TSS) atau padatan tersuspensi (partikel yang mengapung seperti sisa makanan atau serat) dan *Total Dissolved Solids* (TDS) atau padatan terlarut (bahan kimia terlarut seperti garam dari deterjen).

2. Karakteristik Kimia

Karakteristik kimia ini sifat-sifat yang berkaitan dengan senyawa kimia di dalam limbah. Parameter yang paling penting adalah derajat keasaman (pH), yang dapat berubah-ubah limbah dapur cenderung asam akibat pembusukan, sementara limbah cucian cenderung basa akibat deterjen. Indikator utama pencemaran organik diukur sebagai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Selain itu, limbah *grey water* kaya akan nutrisi, terutama Fosfat (PO_4) dan Nitrogen (N), yang sebagian besar disumbangkan oleh deterjen dan pembersih.

3. Karakteristik Biologi

Karakteristik biologi ini berkaitan dengan keberadaan mikroorganisme di dalam air limbah. Meskipun *grey water* dianggap memiliki beban patogen yang jauh lebih rendah dibandingkan *black water* (limbah toilet), air ini tetap tidak steril. *Grey water* masih dapat mengandung berbagai bakteri, termasuk bakteri coliform seperti *E. coli* dari sisa pencucian bahan makanan mentah atau dari kontaminasi silang serta jamur dan virus. Keberadaan mikroorganisme ini menjadi penting karena mereka

berperan dalam proses pembusukan alami, namun juga membawa risiko kesehatan jika tidak dikelola dengan baik.

A.5 Kandungan Limbah Cair Domestik

Limbah cair domestik mengandung *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Dissolved Solids* (TDS), suhu, pH (Laksmi et al., 2023)

1. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

BOD parameter ini mengukur jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme seperti bakteri untuk menguraikan bahan organik yang ada di dalam air limbah. Kandungan BOD yang tinggi, terutama dari limbah dapur yang kaya sisa makanan bisa mencapai 250-1.000 mg/L, menunjukkan tingginya tingkat pencemaran organik. Jika dibuang ke sungai, bahan organik ini akan merebut oksigen dari air dan menyebabkan kematian biota air.

2. *Chemical Oxygen Demand* (COD)

COD mengukur jumlah total oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi semua bahan organik di dalam air secara kimiawi, baik yang mudah terurai (*biodegradable*) maupun yang sulit terurai (*non-biodegradable*) seperti deterjen. Nilai COD selalu lebih tinggi dari BOD. Rasio antara BOD dan COD sering digunakan untuk menentukan seberapa mudah limbah tersebut dapat diolah secara biologis.

3. *Total Suspended Solids* (TSS)

TSS adalah semua partikel padat yang tidak larut di dalam air, seperti sisa makanan yang hancur, serat kain dari mesin cuci, atau kotoran. TSS adalah penyebab utama kekeruhan fisik pada *grey water*. Kandungan TSS yang tinggi dapat menyumbat sistem perpipaan dan menghalangi penembusan sinar matahari di badan air, mengganggu fotosintesis tumbuhan air.

4. *Total Dissolved Solids* (TDS)

TDS adalah semua bahan yang terlarut dalam air, baik organik maupun anorganik. Pada *grey water*, kandungan TDS sering kali tinggi akibat garam-garam, *surfaktan* (bahan aktif deterjen), dan fosfat yang larut dari

sabun dan pembersih. Kandungan TDS yang tinggi dapat memengaruhi keseimbangan tekanan larutan pada kehidupan akuatik.

5. Suhu

Suhu *grey water* biasanya berkisar antara 25°C hingga 35°C, sedikit lebih tinggi dari suhu lingkungan. Peningkatan suhu ini, meskipun terlihat sepele, dapat mempercepat laju reaksi kimia dan biologis, termasuk mempercepat laju pembusukan bahan organik yang dapat menimbulkan bau tidak sedap lebih cepat.

6. pH

pH (Derajat Keasaman) adalah parameter yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan suatu cairan. *Grey water* memiliki pH yang sangat bervariasi tergantung sumbernya. Air bekas cucian piring (dapur) sering kali bersifat asam pH 4,2 – 6,5 karena dekomposisi sisa makanan, sementara air bekas cucian pakaian (laundry) sangat basa pH bisa > 9 karena penggunaan deterjen. *Fluktuasi* pH yang ekstrem ini dapat merusak ekosistem perairan jika dibuang langsung.

Tabel 2. 1 Baku Mutu Limbah Domestik

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor: 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik dan Standar Teknologi Pengolahan Air limbah.

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
BOD	mg/L	12
COD	mg/L	40
TSS	mg/L	20
pH	-	6 s.d 9
Minyak & Lemak	mg/L	5
Amonia Total	mg/L	5
Total Coliform	Jlm/100 mL	200

A.6 Dampak Limbah Cair Domestik Bagi Kesehatan Manusia dan Lingkungan

Berikut adalah dampak limbah cair domestik bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Widjaja et al., 2022):

1. Menyebarkan penyakit diare, kolera, dan tifus Ini adalah bahaya paling langsung. Air limbah kita, terutama yang dari toilet, penuh dengan kuman penyakit seperti bakteri *E. coli* dan *Salmonella*. Kuman ini akan mencemari air sumur dan air sungai. Saat kita memakai air yang tercemar itu untuk minum, masak, atau sikat gigi, kita jadi mudah terkena diare, kolera, disentri, dan tifus. Ini juga jadi salah satu penyebab utama anak-anak gagal tumbuh (*stunting*) karena sering sakit.
2. Menciptakan kuman super yang kebal obat ini adalah ancaman baru yang serius. Saat kita minum antibiotik, sisa obat dan kuman yang kebal ikut terbuang ke saluran air. Di dalam got, kuman ini mengajari kuman lain untuk ikut kebal. Akibatnya, air di lingkungan kita dipenuhi kuman super. Jika kita terinfeksi kuman ini, obat antibiotik biasa tidak akan mempan lagi, dan penyakit yang tadinya ringan bisa jadi sangat berbahaya.
3. Menjadi sarang nyamuk DBD dan Malaria limbah deterjen bekas cucian kita membuat eceng gondok dan lumut (*alga*) tumbuh subur di sungai atau rawa. Permukaan air yang tertutup eceng gondok menciptakan genangan air yang tenang. Ini adalah tempat favorit nyamuk untuk bertelur. Akibatnya, risiko penyakit Demam Berdarah (DBD) dan Malaria di lingkungan kita jadi semakin tinggi.
4. Kita ikut memakan plastik (*mikroplastik*) setiap kali kita mencuci baju terutama baju berbahan poliester, nilon, ribuan serat plastik super kecil (*mikroplastik*) ikut terbuang ke air. Plastik kecil ini dimakan oleh ikan dan kerang di sungai atau laut. Saat kita makan

ikan atau kerang tersebut, plastik-plastik itu ikut masuk ke dalam tubuh kita.

5. Kehilangan pekerjaan dan sumber makanan limbah sisa makanan dan kotoran kita (bahan organik) dirusak oleh bakteri di sungai. Proses ini menyedot semua oksigen di dalam air. Akibatnya, ikan-ikan tidak bisa bernapas dan mati massal. Bagi nelayan, ini berarti kehilangan pekerjaan. Bagi kita, ini berarti kehilangan sumber makanan yang penting.
6. Menyebabkan banjir dan krisis air bersih eceng gondok dan lumut yang mati karena limbah deterjen akan tenggelam dan menjadi lumpur. Ini membuat sungai dan danau jadi makin dangkal. Akibatnya, banjir jadi lebih mudah terjadi saat hujan. Selain itu, air sungai yang terlalu kotor membuat PDAM kesulitan dan butuh biaya mahal untuk mengolahnya jadi air bersih, yang akhirnya bisa menyebabkan kita kekurangan air bersih.
7. Air jadi pengap dan mematikan ikan limbah sisa makanan dan kotoran (bahan organik) adalah makanan lezat bagi bakteri di sungai. Saat bakteri berpesta memakan limbah ini, mereka menghirup oksigen di dalam air. Akibatnya, air jadi pengap kadar oksigennya habis. Ikan, udang, dan hewan air lainnya tidak bisa bernapas dan akhirnya mati lemas secara massal.
8. Sungai jadi taman eceng gondok dan lumut limbah deterjen (mengandung *fosfat*) dan urin (mengandung nitrogen) bertindak seperti pupuk super di air. Ini memicu ledakan pertumbuhan eceng gondok dan lumut yang tak terkendali. Permukaan air jadi tertutup rapat, sehingga sinar matahari tidak bisa tembus ke dasar. Tumbuhan air di bawahnya mati, dan ekosistem jadi tidak seimbang.
9. Sungai jadi dangkal dan bau busuk. Saat eceng gondok dan lumut yang meledak tadi mati, mereka akan tenggelam dan membusuk di dasar. Proses pembusukan ini menghasilkan endapan lumpur (*sedimentasi*) yang membuat sungai dan danau jadi semakin

dangkal. Proses pembusukan ini juga melepaskan gas bau busuk (seperti H_2S) yang mencemari udara.

10. Air sungai menjadi racun bagi ikan bahan kimia aktif di dalam deterjen dan sabun (*surfaktan*) adalah racun langsung bagi hewan air. Zat ini merusak lapisan lendir dan insang ikan, membuat mereka sulit bernapas dan gampang terserang penyakit. Zat ini juga bisa mengganggu hormon dan kemampuan ikan untuk berkembang biak.
11. Air sungai dipenuhi sampah plastik setiap kali kita mencuci baju terutama yang bahannya poliester, nilon, ribuan serat plastik super kecil (*mikroplastik*) ikut terbuang ke air. Plastik ini tidak bisa hancur dan akan mengotori sungai hingga lautan. Plankton, ikan kecil, dan kerang akan memakan plastik ini, sehingga racun masuk ke rantai makanan dari level paling bawah.
12. Lingkungan menjadi kandang kuman kebal air limbah juga membuang sisa antibiotik dan bakteri yang sudah kebal obat. Di dalam got dan sungai, gen kebal obat ini menyebar ke bakteri normal yang ada di lingkungan. Akibatnya, air dan tanah di sekitar kita menjadi kandang bagi kuman super kuat yang merusak keseimbangan mikroba alami di lingkungan.

A.7 Komposisi Air Limbah Domestik

Air limbah rumah tangga itu sebenarnya 99% lebih isinya air, tapi yang 1% sisanya itulah yang jadi masalah besar. 1% ini adalah campuran dari kotoran pembusuk seperti tinja dan sisa makanan yang menghabiskan oksigen di air sehingga membuat ikan-ikan mati. Selain itu, ada juga pupuk yang berasal dari urin dan deterjen, yang membuat eceng gondok tumbuh meledak. Terakhir, limbah ini membawa banyak sekali bibit penyakit, seperti bakteri dan virus dari toilet yang bisa membuat kita sakit (Gabriela & Purnomo, 2022).

Selain kotoran tadi, penelitian baru menemukan ada masalah modern di air limbah kita. Pertama, air limbah jadi tempat berkembang biaknya kuman super yang kebal obat (antibiotik). Kedua, limbah kita sekarang dipenuhi polutan baru ada jutaan serat plastik super kecil (mikroplastik) dari baju

yang kita cuci, dan ada juga sisa-sisa obat, sabun, atau kosmetik yang kita pakai. Semua polutan baru ini sangat sulit dihilangkan dan bisa menumpuk di tubuh ikan, yang akhirnya kita makan (Dan & Toksisitas, 2025).

B. Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah konsep teknologi pengolahan yang memanfaatkan sistem biologis alami, yang sering dikategorikan sebagai teknologi hijau (*green technology*). Istilah ini berasal dari dua kata, yaitu *phyto* (bahasa Yunani) yang berarti tumbuhan dan *remedium* (bahasa Latin) yang berarti memperbaiki atau memulihkan. Secara lebih komprehensif, fitoremediasi bukan sekadar proses penanaman tumbuhan di media limbah, melainkan sebuah sistem bioremediasi terpadu yang mengeksplorasi proses fisiologis, biokimia, dan anatomi tumbuhan beserta mikrobioma yang menyertainya untuk mendetoksifikasi kontaminan.

Keberhasilan teknologi ini ditopang oleh mekanisme spesifik yang bekerja secara simultan di dalam dan di luar tubuh tanaman. Menurut (Priyanto & Prayitno et al., 2021), terdapat lima mekanisme dasar yang mendefinisikan bagaimana fitoremediasi bekerja dalam lingkungan perairan:

1. Rizofiltrasi (*Rhizofiltration*). Proses penyerapan, pengendapan, dan presipitasi kontaminan yang berada di dalam air oleh sistem perakaran tanaman. Akar bertindak sebagai filter biologis pasif yang mengikat polutan dari media air.
2. Fitoekstraksi (*Phytoextraction*). Mekanisme di mana akar tanaman menyerap polutan terlarut, kemudian memindahkannya (*translokasi*) dan menumpuknya (*akumulasi*) secara permanen di bagian jaringan tanaman yang berada di atas air/tanah, seperti batang dan daun.
3. Fitodegradasi (*Phytodegradation*). Proses perombakan zat polutan organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dan tidak beracun. Pemecahan ini terjadi di dalam jaringan tumbuhan dengan bantuan enzim spesifik yang diproduksi oleh tumbuhan itu sendiri, seperti enzim *reduktase* dan *oksigenase*.

4. Rizodegradasi (*Rhizodegradation*). Penguraian polutan organik yang terjadi di luar tubuh tanaman, tepatnya di area sekitar perakaran (*rizosfer*). Akar melepaskan cairan alami (*eksudat akar*) yang kaya karbohidrat dan asam amino untuk merangsang pertumbuhan bakteri pengurai miliaran kali lipat lebih cepat. Bakteri inilah yang secara aktif menurunkan kadar BOD limbah cair.
5. Fitovolatilisasi (*Phytovolatilization*). Mekanisme di mana tanaman menyerap polutan melalui air, memodifikasinya di dalam jaringan, dan melepaskannya kembali ke atmosfer melalui proses penguapan dari stomata daun (*transpirasi*) dalam bentuk gas yang sudah tidak berbahaya.

Dalam konteks sanitasi, aplikasi yang paling umum adalah dalam sistem *Constructed Wetlands* (Lahan Basah Buatan), di mana tanaman ditanam dalam suatu bak atau reaktor terkontrol yang dialiri air limbah, menciptakan ekosistem buatan yang meniru proses pemurnian alami di rawa (Rustiah et al., 2023).

B.1 Mekanisme Fitoremediasi dalam Menurunkan BOD

Penurunan Biological Oxygen Demand dalam sistem fitoremediasi tidak terjadi karena tanaman menyerap bahan organik secara langsung, melainkan melalui kerja sama simbiosis mutualisme antara tanaman dan mikroorganisme di area perakaran. Penurunan kadar BOD ini utamanya didorong oleh dua mekanisme biologis secara bersamaan, yaitu:

1. Rizodegradasi (Degradasi di Zona Perakaran). Tanaman air mengeluarkan zat eksudat akar (*root exudates*) yang mengandung asam amino, enzim, dan gula. Eksudat ini berfungsi sebagai sumber nutrisi yang menstimulasi pertumbuhan dan aktivitas bakteri aerob di zona rizosfer (area sekitar akar). Bakteri-bakteri inilah yang bertindak sebagai agen pengurai utama. Mereka memecah senyawa polutan organik kompleks yang ada di dalam *grey water* (limbah sisa makanan, deterjen, sabun) menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2). Proses perombakan oleh bakteri ini langsung berdampak pada menurunnya jumlah

oksigen yang dibutuhkan untuk mengurai polutan, yang secara otomatis menurunkan angka BOD (Ardiatma et al., 2023).

2. Pelepasan Oksigen Akar (Radial Oxygen Loss / ROL). Agar bakteri aerob dapat mengoksidasi bahan organik dengan cepat, mereka membutuhkan suplai oksigen yang tinggi. Dalam air limbah yang tergenang (stagnan), kadar oksigen terlarut sangat menipis. Di sinilah peran krusial tanaman fitoremediasi. Tanaman menyerap oksigen dari udara bebas melalui pori-pori daun, lalu mentransfernya ke bawah melalui jaringan berongga pada batang (aerenkim), dan melepaskannya langsung ke dalam air melalui ujung-ujung akar. Suplai oksigen ini mencegah air menjadi anaerob (membusuk dan bau) dan memastikan bakteri pengurai tetap hidup dan bekerja maksimal mengikis kadar BOD. Area akar yang luas (akar serabut) juga menyediakan media lekat (attached growth) yang sangat baik bagi koloni bakteri pengurai untuk berkembang biak melimpah dibandingkan dengan limbah yang tidak ditanami (kelompok kontrol) (Ardiatma et al., 2023).

B.2 Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi

1. Kelebihan Fitoremediasi

Kelebihan dan kekurangan fitoremediasi (Mayasari et al., 2025):

- a. Keunggulan utamanya biaya rendah, baik dari segi investasi awal konstruksi maupun operasional, karena tidak memerlukan mesin atau pompa berenergi tinggi dan tidak bergantung pada bahan kimia mahal.
- b. Keunggulan kedua ramah lingkungan teknologi ini tidak menggunakan bahan kimia tambahan dan menghasilkan lumpur biologis yang jauh lebih sedikit dan lebih stabil dibandingkan sistem konvensional seperti lumpur aktif.
- c. Ketiga, sistem ini memiliki nilai estetika, di mana hamparan tanaman air dapat menambah keindahan lingkungan.

- d. Keempat, operasional dan perawatannya mudah, relatif hanya membutuhkan pemeliharaan tanaman secara berkala (pemanenan biomassa).

2. Kekurangan Fitoremediasi

- a. Keterbatasan utama adalah membutuhkan lahan yang relatif lebih luas dibandingkan sistem pengolahan mekanis atau kimia untuk mengolah volume limbah yang sama.
- b. Selain itu, proses biologis ini membutuhkan waktu tinggal yang umumnya lebih lama bisa berhari-hari untuk mencapai efisiensi penurunan polutan yang setara.
- c. Sistem ini juga lebih rentan terhadap faktor eksternal seperti kondisi iklim perubahan suhu ekstrem dan serangan hama penyakit yang dapat mempengaruhi performa tanaman.

C. Sistem *Batch*

Sistem *batch* adalah sistem reaktor tertutup yang beroperasi secara berkelanjutan. Prinsip kerjanya adalah sejumlah volume limbah cair dimasukkan ke dalam reaktor misal bak atau ember penelitian pada satu waktu (Hari ke-0). Limbah tersebut kemudian didiamkan di dalam reaktor untuk berkontak dan bereaksi dengan agen fitoremediasi (tanaman) selama periode waktu tertentu yang telah ditetapkan, yang disebut sebagai waktu tinggal atau waktu retensi misal 3 hari, 6 hari, 9 hari). Selama waktu retensi ini, tidak ada penambahan *influen* baru ataupun pengeluaran *efluen*. Sampel air diambil secara berkala untuk dianalisis. Setelah waktu retensi berakhir, seluruh air olahan dikeluarkan, reaktor dibersihkan jika perlu, dan siap diisi kembali dengan limbah baru untuk siklus berikutnya. Desain *batch* ini sangat ideal untuk penelitian skala laboratorium karena memungkinkan kontrol yang tinggi terhadap variabel dan memudahkan studi kinetika pelacakan laju penurunan polutan dari waktu ke waktu (Maulidia et al., 2024).

C.1 Perawatan Tanaman Sistem *Batch*

Perawatan ini mencakup pemantauan kondisi fisik tanaman, seperti memastikan tanaman tidak layu, menguning, atau mati. Jika tanaman tumbuh terlalu lebat, perlu dilakukan pemanenan pengambilan sebagian tanaman secara berkala. Pemanenan ini penting untuk menjaga agar tanaman tetap muda dan aktif menyerap polutan, sekaligus mencegah tanaman yang mati membusuk di dalam air, yang justru dapat menambah polutan baru (Ramadhani et al., 2023).

C.2 Kelebihan dan Kekurangan Sistem *Batch*

1. Kelebihan Sistem *Batch*

Kelebihan dan kekurangan *system batch* (Maulidia et al., 2024):

- a. Kelebihan utamanya kontrol yang sangat tinggi peneliti dapat secara teliti mengontrol volume limbah, konsentrasi awal polutan, kepadatan tanaman, dan waktu penyimpanan.
- b. Sistem ini juga sederhana dan murah untuk dibuat tidak memerlukan pompa atau sistem aliran yang kompleks.
- c. Selain itu, sistem ini ideal untuk studi komparatif seperti penelitian ini membandingkan Melati Air dan Genjer karena kedua perlakuan dapat dijalankan secara paralel dalam kondisi yang identik.

2. Kekurangan Sistem *Batch*

- a. Sistem ini tidak berkelanjutan, sehingga kurang mencerminkan kondisi nyata di lapangan di mana limbah domestik dihasilkan secara terus-menerus.
- b. Air bersifat stagnan (tidak mengalir), jika beban organik (BOD) terlalu tinggi melebihi kapasitas transfer oksigen tanaman, terdapat potensi terjadinya kondisi anaerobik di dasar reaktor yang dapat menimbulkan bau.

D. Klasifikasi Tanaman

D.1 Melati Air (*Echinodorus palaefolius*)

Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) merupakan tanaman air menahun dari famili Alismataceae, sama seperti Genjer. Tanaman ini berasal dari daerah tropis dan subtropis Amerika, namun kini banyak dibudidayakan

sebagai tanaman hias air di seluruh dunia. Melati Air diklasifikasikan sebagai tanaman *emergent*, artinya akarnya tertanam dalam lumpur di dasar perairan dangkal, sementara sebagian besar daun dan tangkai bunganya menjulang ke atas permukaan air. Daunnya berbentuk bulat telur hingga lonjong (sering disebut *spoon-shaped*), berwarna hijau cerah, dan ditopang oleh tangkai daun (*petiole*) yang panjang dan kokoh. Sistem perakarannya berupa rimpang (*rhizome*) yang kuat dan berserabut, mampu membentuk rumpun yang padat dan rimbun. Bagian bunganya berwarna putih bersih, biasanya dengan bagian tengah kekuningan, tersusun dalam rangkaian bunga (*inflorescence*) yang tinggi dan sering kali bercabang. Berbeda dengan Genjer yang dimanfaatkan sebagai sayuran, Melati Air utamanya dikenal sebagai tanaman hias populer untuk kolam atau *aquascape*. Dalam penelitian ini, massa tanaman yang digunakan adalah 300-gram untuk setiap reaktor. Pemilihan berat ini didasarkan pada kepadatan tanaman yang dianggap optimal untuk menutupi permukaan reaktor sistem batch, guna memastikan kontak maksimal antara perakaran tanaman dengan polutan organik dalam grey water tanpa menyebabkan kompetisi nutrisi antar tanaman yang berlebihan. Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) termasuk kedalam kategori berikut (Fatiha et al., 2025):

<i>Kingdom</i>	: <i>Plantae</i>
<i>Subkingdom</i>	: <i>Tracheobionta</i> (Tumbuhan berpembuluh)
<i>Super Divisi</i>	: <i>Spermatophyta</i> (Menghasilkan biji)
<i>Divisi</i>	: <i>Magnoliophyta</i> (Tumbuhan berbunga)
<i>Kelas</i>	: <i>Liliopsida</i> (Berkeping tunggal / <i>Monokotil</i>)
<i>Sub kelas</i>	: <i>Alismatidae</i>
<i>Ordo</i>	: <i>Alismatales</i>
<i>Famili</i>	: <i>Alismataceae</i>
<i>Genus</i>	: <i>Echinodorus</i>
<i>Spesies</i>	: <i>Echinodorus palaefolius</i> (Griseb.) J.F. Macbr.



Gambar 2. 1 Melati Air (Echinodorus Palaefolius)

Sumber: Widjaja, B. Taufik. (2013). Aquascape: Pesona Taman dalam Akuarium.

1. Morfologi Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*)

Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) atau *Mexican Sword Plant*, adalah tanaman dua alam yang tumbuh dalam bentuk roset, artinya daun-daunnya tumbuh melingkar dari satu titik pusat di pangkal. Tanaman ini tidak memiliki batang sejati yang menjulang sebaliknya, batangnya termodifikasi menjadi rimpang (*rhizome*) tebal yang terbenam di dasar berlumpur. Akar bawah ini berfungsi sebagai jangkar kokoh dan menjadi tempat tumbuhnya akar-akar serabut yang berfungsi menyerap nutrisi dari media tanam. Bagian paling dominan dan paling mudah dikenali dari tanaman ini adalah daunnya. Daun-daun ini disangga oleh tangkai daun (*petiole*) yang panjang dan tegak, yang sering disalahartikan sebagai batang. Helaian daunnya berbentuk oval menyerupai sendok besar, berwarna hijau segar, dan bisa tumbuh menjulang 20-40 cm di atas permukaan air. Ciri khas daunnya adalah memiliki 5 hingga 7 urat daun utama yang terlihat jelas dan melengkung paralel dari pangkal hingga ke ujung daun.

Sesuai namanya, tanaman ini menghasilkan bunga yang menyerupai melati. Bunga-bunga ini muncul pada tangkai perbungaan (*scape*) yang panjang dan ramping, sering kali tumbuh lebih tinggi dari daunnya. Bunga-bunga ini tersusun dalam beberapa karangan di sepanjang tangkai tersebut. Setiap bunga individu memiliki tiga mahkota berwarna putih bersih, kontras dengan bagian tengahnya putik dan benang sari yang berwarna kuning

cerah. Bunga ini biasanya mekar di pagi hari dan akan layu menjelang sore (Ayuningtyas et al., 2023).

2. Efektivitas dan Umur Tanaman

Tanaman ini telah terbukti efektif dalam menurunkan polutan organik dan nutrisi dalam berbagai penelitian *constructed wetlands* (lahan basah buatan) untuk menurunkan beban pencemar air limbah. Untuk mencapai efektivitas maksimal dalam penelitian, umur tanaman yang digunakan harus diperhatikan. Melati Air yang digunakan harus berada dalam fase pertumbuhan dewasa muda (sekitar usia 4-8 minggu) dengan kondisi fisik yang seragam. Secara spesifik, tanaman yang dipilih harus memiliki tinggi minimal 25 cm dengan jumlah daun minimal 3-6 helai daun produktif dengan kondisi sehat. Pemilihan fase ini sangat penting karena pada masa dewasa muda, tanaman memiliki laju metabolisme dan aktivitas fotosintesis yang sangat tinggi, serta sistem perakaran serabut yang sedang aktif berkembang.

Kondisi akar yang muda dan sehat ini mampu memfasilitasi proses *rizodegradasi* secara maksimal melalui pelepasan cairan akar yang memicu aktivitas mikroorganisme pengurai di sekitar perakaran. Sebaliknya, tanaman yang terlalu tua atau memasuki fase penuaan harus dihindari karena laju serapan nutrisinya menurun, pembusukan biomassa pada akar dan daun tanaman tua justru akan melepaskan kembali bahan organik ke dalam sistem. Hal ini secara langsung akan menambah beban BOD dalam reaktor, sehingga menggagalkan tujuan utama dari proses fitoremediasi tersebut (Salsa et al., 2025).

3. Mekanisme Kerja Melati Air dalam Menurunkan BOD

Cara kerja utama Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) dalam menurunkan polutan bersandar pada sistem Rizofiltrasi melalui arsitektur rimpang (rhizome) dan akar serabutnya yang sangat rimbun dan ekstensif. Sistem akar serabut ini bertindak layaknya jaring atau filter biologis alami yang sangat rapat di dalam air limbah. Ketika *grey water* bersentuhan dengan akar Melati Air, padatan tersuspensi dan polutan organik akan

terperangkap pada serabut akar. Daunnya yang lebar juga memicu laju transpirasi (penguapan air) yang tinggi, sehingga tanaman terus "menarik" air limbah dari bawah ke atas, menciptakan sirkulasi mikro di sekitar akar. Proses penarikan ini membawa molekul polutan mendekat ke zona perakaran di mana koloni mikroorganisme pendegradasi organik sudah menunggu untuk memecah polutan tersebut (Salsa et al., 2025).

Kinerja optimal rizofiltrasi pada *Echinodorus palaefolius* ini sangat didukung oleh ekskresi eksudat akar (*root exudates*) berupa asam organik, asam amino, dan karbohidrat molekul rendah. Eksudat ini tidak hanya berfungsi sebagai nutrisi pemacu multiplikasi bakteri pengurai di zona rizosfer, tetapi juga bertindak sebagai *buffer* alami yang menstabilkan kondisi pH limbah cair domestik yang cenderung basa akibat sisa deterjen pencucian (Widyastuti & Sari et al., 2022).

D.2 Genjer (*Limnocharis flava*)

Genjer (*Limnocharis flava*) merupakan tanaman air menahun (*perennial aquatic plant*) dari famili *Alismataceae*, sama seperti Melati Air. Tanaman ini sering ditemukan tumbuh liar di rawa-rawa, sawah, atau perairan dangkal lainnya di daerah tropis. Genjer diklasifikasikan sebagai tanaman *emergent*, artinya sebagian akarnya terendam air atau lumpur, sementara tangkai daun dan bunganya menjulang ke atas permukaan air. Daunnya berbentuk bulat telur hingga lonjong, berwarna hijau mengilap, dengan tangkai daun yang panjang dan berongga. Sistem perakarannya juga berserabut dan cukup ekstensif, meskipun mungkin tidak serimbun Melati Air. Bagian bunganya berwarna kuning cerah, tersusun dalam malai. Genjer dikenal sebagai gulma di pertanian namun juga dimanfaatkan sebagai sayuran. Dalam penelitian ini, massa tanaman yang digunakan adalah 300-gram untuk setiap reaktor. Pemilihan berat ini didasarkan pada kepadatan tanaman yang dianggap optimal untuk menutupi permukaan reaktor sistem *batch*, guna memastikan kontak maksimal antara perakaran tanaman dengan polutan organik dalam *grey water* tanpa menyebabkan kompetisi nutrisi

antar tanaman yang berlebihan. Genjer (*Limnocharis flava*) termasuk kedalam kategori berikut (Parwati & Hendri, 2025):

Kingdom : *Plantae*
Subkingdom : *Tracheobionta* (Tumbuhan berpembuluh)
Super Divisi : *Spermatophyta* (Menghasilkan biji)
Divisi : *Magnoliophyta* (Tumbuhan berbunga)
Kelas : *Liliopsida* (Berkeping tunggal / Monokotil)
Sub kelas : *Alismatidae*
Ordo : *Alismatales*
Famili : *Alismataceae*
Genus : *Limnocharis*
Spesies : *Limnocharis flava* (L.) Buchenau



Gambar 2. 2 Genjer (*Limnocharis Flava*)

Sumber: *Plant Resources of South-East Asia (PROSEA) 8: Vegetables.*

1. Morfologi Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*)

Genjer (*Limnocharis flava*) adalah tumbuhan air tawar yang hidup berumpun (*roset*) di perairan dangkal atau media berlumpur seperti sawah dan rawa. Batang sejatinya termodifikasi menjadi rimpang (*rhizome*) pendek yang terbenam, yang berfungsi sebagai jangkar dan tempat tumbuhnya akar serabut. Sistem perakaran serabut ini terbukti sangat efisien dalam menyerap nutrisi dan polutan seperti amonia dari air, sehingga sering diteliti potensinya sebagai agen fitoremediasi atau pembersih air alami. Ciri

morfologi Genjer yang paling unik dan mudah dikenali adalah tangkai daunnya (*petiole*). Tangkai daun ini tumbuh panjang dan tegak, memiliki struktur berdaging (*sukulen*) namun berongga-rongga seperti spons (mengandung *aerenkim*) untuk membantunya mengapung dan bernapas di air. Jika dipotong melintang, tangkai daun ini jelas berbentuk segitiga. Di ujung tangkai terdapat helaian daun tunggal berbentuk lonjong berwarna hijau segar dan mengkilap (Sholeha et al., 2022).

Bagian reproduktif tanaman ini adalah bunga majemuk yang tersusun seperti payung (*umbel*) di ujung tangkai bunga yang juga panjang. Setiap kuntum bunga memiliki tiga mahkota (*petal*) yang sangat mencolok berwarna kuning cerah, dengan banyak benang sari di tengahnya. Setelah penyerbukan, bunga akan berkembang menjadi buah kapsul bulat. Setiap buah ini mampu menghasilkan biji dalam jumlah yang sangat besar (*prolifik*), yang menjadi alasan utama mengapa Genjer dapat menyebar dengan sangat cepat dan terkadang dianggap sebagai gulma invasif di beberapa ekosistem perairan (Musawwa & Indah, 2021).

2. Efektivitas dan Umur Tanaman

Tanaman ini telah terbukti efektif dalam menurunkan polutan organik dan nutrisi dalam berbagai penelitian *constructed wetlands* (lahan basah buatan) untuk menurunkan beban pencemar air limbah. Fase paling efektif adalah pada fase pertumbuhan vegetatif cepat tanaman muda hingga dewasa awal. Dalam aplikasi fitoremediasi, tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) yang digunakan harus berada pada fase pertumbuhan vegetatif aktif dengan kriteria usia bibit berkisar antara 2 hingga 4 minggu setelah masa semai. Secara morfologis, tanaman tersebut idealnya memiliki tinggi 15-25 cm dengan jumlah daun minimal 3-5 helai yang dalam kondisi sehat (tidak klorosis), serta memiliki sistem perakaran serabut yang rimbun untuk mendukung aktivitas mikroorganisme pada area *rhizosphere*. Pemilihan tanaman pada rentang usia dan kondisi fisik yang seragam ini sangat krusial karena pada fase tersebut, laju metabolisme tanaman sedang berada pada titik maksimal dalam menyerap nutrisi dan polutan organik, sehingga proses penurunan kadar BOD dan akumulasi polutan dalam jaringan batang

maupun daun dapat berlangsung secara optimal sebelum tanaman memasuki fase dewasa. Karena biomassa bertambah dengan cepat, tanaman akan cepat menjadi tua dan padat. Jika tidak dikelola, tanaman tua akan mati, membusuk di dalam reaktor, dan melepaskan kembali nutrisi serta bahan organik (BOD) yang telah diserapnya. Oleh karena itu, dalam aplikasi fitoremediasi menggunakan Genjer, pemanenan pengambilan biomassa secara berkala menjadi sebuah keharusan untuk menjaga sistem tetap efektif dan mengeluarkan polutan yang terakumulasi di daun/batang secara permanen dari sistem (Ramagita et al., 2025).

3. Mekanisme Kerja Genjer dalam Menurunkan BOD

Berbeda dengan Melati Air yang mengandalkan kerimbunan akar, rahasia utama tingginya efektivitas Genjer (*Limnocharis flava*) terletak pada anatomi Jaringan Aerenkim (rongga udara) yang sangat masif pada tangkai daunnya (petiole) yang bersifat sukulen dan tebal. Tangkai berongga ini bekerja layaknya "pipa saluran oksigen" alami yang berkapasitas besar. Dalam kondisi *grey water* yang anaerob dan miskin oksigen akibat tingginya bahan organik, Genjer mampu memompa oksigen dari udara bebas menembus batang hingga dipancarkan keluar melalui akarnya (*Radial Oxygen Loss*) dengan volume yang jauh lebih besar dan cepat dibandingkan tanaman air lainnya. Lingkungan perairan yang sangat kaya oksigen ini menyebabkan bakteri aerob pendegradasi polutan dapat berkembang biak meledak di sekitar akar Genjer, memecah rantai karbon bahan organik pencemar dengan sangat agresif. Hal inilah yang menjadi alasan ilmiah mengapa Genjer mampu mereduksi kadar BOD lebih efektif dibandingkan tanaman lain (Sholeha et al., 2022).

Struktur aerenkim pada *Limnocharis flava* diketahui memiliki rongga udara (*lacunae*) yang secara makroskopis lebih besar dan terstruktur dibandingkan banyak tanaman air *emergent* lainnya. Anatomi ini memfasilitasi tingkat konduktivitas oksigen yang sangat tinggi dari atmosfer menuju sistem perakaran (*Radial Oxygen Loss/ROL*). Tingginya suplai oksigen mekanis secara alami ini mencegah terjadinya pergeseran kondisi menjadi anaerobik ekstrem di dasar perairan yang stagnan, sehingga

bakteri aerobik dapat bekerja secara konstan memecah rantai karbon bahan organik penyumbang BOD (Nurhayati et al., 2021).

4. Penelitian Terdahulu

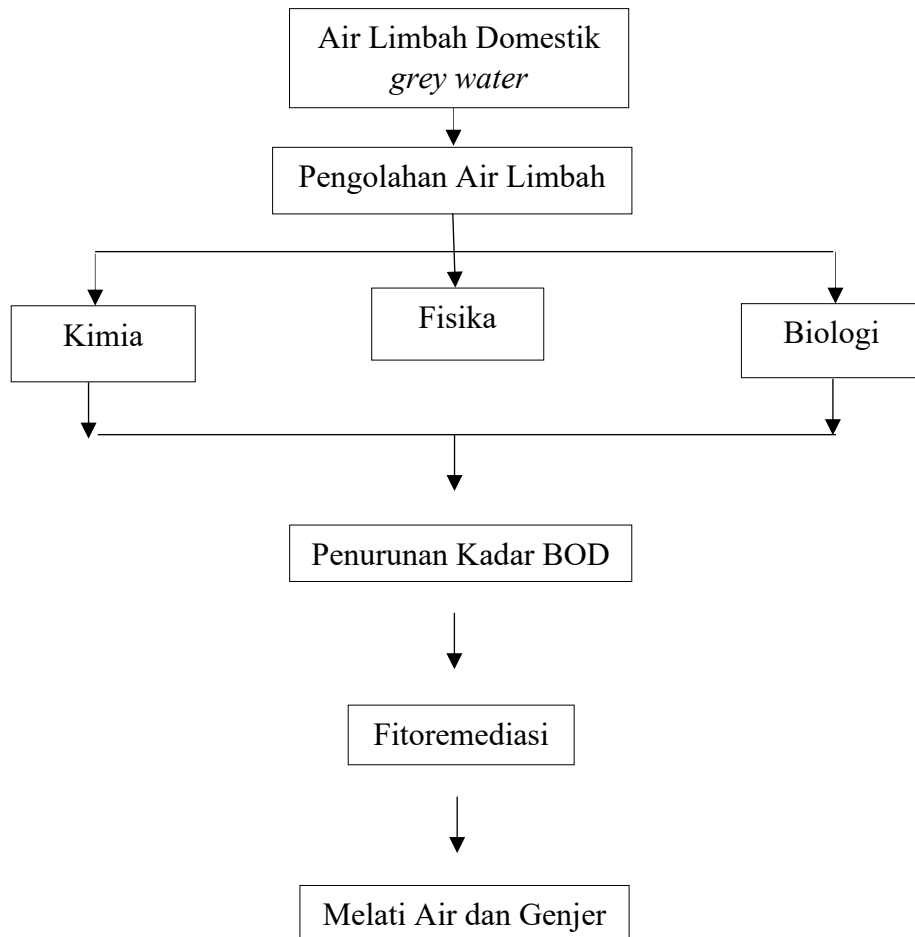
No	Jenis Tanaman	Sumber Data	Jenis Limbah	BOD Awal	BOD Sesudah	Efesiensi Penurunan
1.	Melati Air	(Gusmita, et al., 2022)	Limbah Cair Kelapa Sawit	4.236 mg/L	96 mg/L	97,73%
2.	Genjer	(Zahra, et al., 2022)	Limbah Cair Do-domestik	69 mg/L	1,60 mg/L	97.67%

Berdasarkan tinjauan dari penelitian terdahulu di atas, tingginya angka persentase penurunan BOD dapat dijelaskan secara terperinci dari sumbernya sebagai berikut: Penelitian Gusmita menggunakan Melati Air. Pada penelitian ini, Melati Air terbukti mampu menurunkan BOD limbah cair industri kelapa sawit yang sangat ekstrem (dari 4.236 mg/L menjadi 96 mg/L) dengan efisiensi 97,73%. Tingginya persentase efisiensi ini dipengaruhi oleh lamanya waktu kontak yang diterapkan (9 hari) serta adaptasi akar Melati Air yang sangat agresif dalam mengekskresikan asam organik untuk memecah limbah rantai karbon panjang. Penelitian Gusmita membuktikan bahwa akar serabut Melati Air memiliki ketahanan (*tolerance*) yang sangat kuat terhadap karakteristik limbah yang pekat. Penurunan drastis ini difasilitasi oleh kinerja rizofiltrasi di mana partikel organik terikat kuat di akar lalu secara perlahan dimakan oleh koloni bakteri alami pembawa limbah sawit tersebut. Penelitian Zahra menggunakan Genjer. Penelitian ini mencatatkan efisiensi penurunan BOD limbah cair domestik yang hampir sempurna, yaitu 97,67% (turun dari 69 mg/L menjadi 1,60 mg/L). Jika ditelaah rincian dari sumber penelitiannya, Zahra mengombinasikan kemampuan jaringan aerenkim Genjer dengan sistem aerasi tambahan (aerator) di dalam reaktornya. Bantuan gelembung udara dari aerator menyuplai oksigen secara konstan dan berlimpah tanpa henti ke dalam air. Akibatnya, bakteri aerob tidak hanya bergantung pada pasokan

oksigen dari akar Genjer, tetapi juga mendapat suplai mekanis. Intervensi aerasi inilah yang membuat penguraian bahan organik pencemar berjalan dua kali lipat lebih cepat. Selain itu, beban pencemar awal (BOD) pada penelitian Zahra relatif rendah (69 mg/L), sehingga perakaran Genjer tidak mengalami titik jenuh sebelum polutan habis terurai. Perbedaan teknis (penggunaan aerasi dan beban limbah awal yang lebih rendah) inilah yang menjadi pembeda utama yang menyebabkan hasil efisiensi mereka jauh lebih tinggi dibandingkan simulasi sistem genangan tanpa aerator pada umumnya.

E. Kerangka Teori

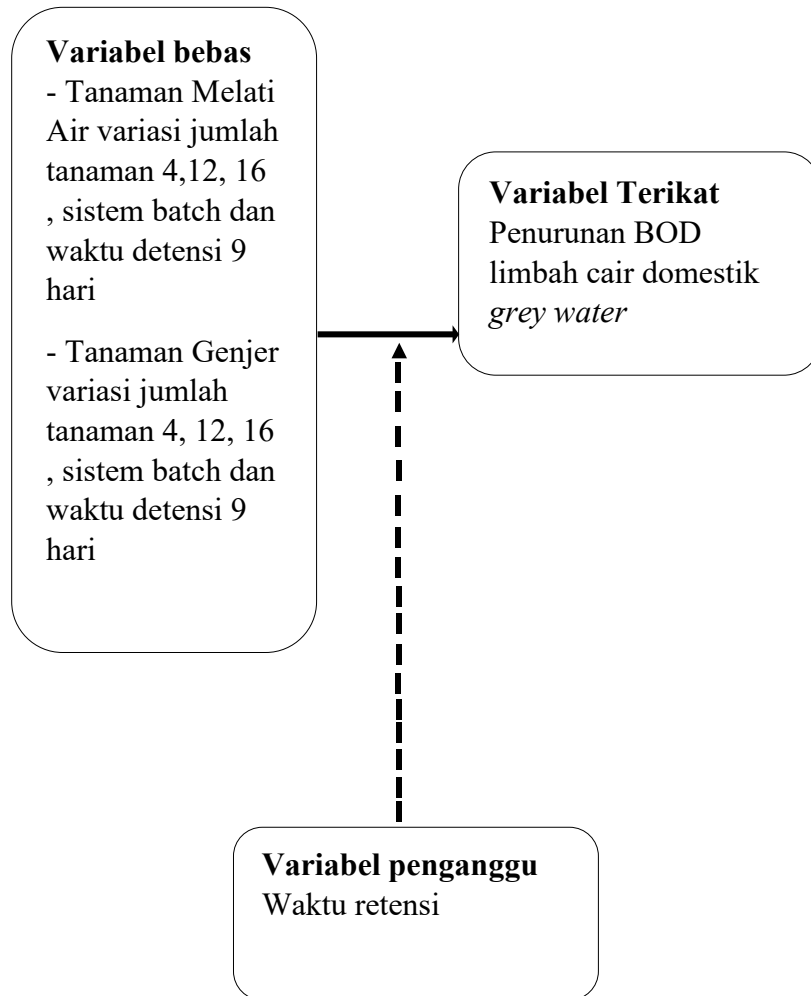
Berdasarkan latar belakang dan tinjauan pustaka, adapun kerangka konsep dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Kerangka Teori

Sumber: Metcalf & Eddy atau Sugiharto (1987)

F. Kerangka Konsep



Gambar 2. 4 Kerangka Konsep

Keterangan:

Diteliti : —————→

Tidak diteliti : - - - - -

G. Defenisi Oprasional

Tabel 2. 2 Defenisi Oprasional

No	Variabel	Definisi Operasional	Alat ukur	Hasil ukur	Skala ukur
1	Melati Air	Melati air adalah sebagai agen penyaring biologis untuk menyerap beban organik pada limbah cair domestik dari Kampung Listrik Bawah.	-	Batang	Nom- inal
2	Genjer	Genjer adalah agen penyaring biologis untuk mendegradasi polutan pada limbah cair domestik dari Kampung Listrik Bawah.	-	Batang	Nom- inal
3	Kadar BOD	Jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan mikroorganisme untuk mengurai bahan organik dalam limbah cair domestik	Pemeriksaan sampel di serahkan ke blkm Medan	Nilai BOD dalam satuan mg/L	Rasio

No	Variabel	Definisi Operasional	Alat ukur	Hasil ukur	Skala ukur
4	Efektivi- tas Penurunan BOD	Persentase kemampuan Melati Air dan Genjer dalam mereduksi kadar BOD selama masa kontak tertentu.	Membanding- kan data hasil uji lab antara <i>pre-test</i> (awal) dan <i>post-test</i> (akhir)	Nilai Persen- tasi (%) Ob- servasi	Rasio

H. Hipotesis Penelitian

1. H₀ (Hipotesis Nol) Tidak terdapat pengaruh dan perbedaan efektivitas yang signifikan antara metode fitoremediasi menggunakan Melati Air (*Echinodorus palaefolius* dan Genjer (*Limnocharis flava*), dalam menurunkan kadar BOD limbah cair domestik *grey water* di Kampung Listrik Bawah Berastagi tahun 2026.
2. H_a (Hipotesis Alternatif) Terdapat pengaruh dan perbedaan efektivitas yang signifikan antara metode fitoremediasi menggunakan Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) dan Genjer (*Limnocharis flava*), dalam menurunkan kadar BOD limbah cair domestik *grey water* di Kampung Listrik Bawah Berastagi tahun 2026.