

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sumber dan karakteristik dan dampak air limbah domestik

2.1.1. Sumber air limbah domestik

Air limbah domestik merujuk pada limbah cair yang dihasilkan dari kegiatan sehari-hari manusia yang berkaitan dengan penggunaan air (Permen LHK, 2016). Sebagian besar air limbah domestik dihasilkan akibat aktivitas manusia. Air limbah berasal dari dua sumber utama, yaitu sumber langsung dan sumber tidak langsung (Weiner et al., 2003). Sumber polutan yang dapat diidentifikasi seperti melalui sistem perpipaan dan saluran disebut sumber langsung air limbah. Contoh sumber langsung limbah domestik adalah limbah yang dikeluarkan melalui pipa dari rumah, area komersial dan rumah sakit, sedangkan sumber air limbah tidak langsung adalah ketika polutan masuk ke badan air melalui sumber yang tidak dapat diidentifikasi maka dikenal sebagai sumber tidak langsung (Weiner et al., 2003) dan (Jamwal et al., 2011). Contoh dari sumber tidak langsung seperti limpasan dari pertanian, hutan, tambang, dan air hujan.

2.1.2. Karakteristik air limbah domestik

Air limbah domestik memiliki sejumlah karakteristik yang bervariasi tergantung pada sumbernya. Karakteristik tersebut dapat dijelaskan dalam tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik air limbah domestik

No	Parameter	Deskripsi	Standard
1	Suhu	1 Sedikit lebih tinggi dibanding air minum	28–31°C
		2 Mempengaruhi aktivitas mikroba	
		3 Mempengaruhi kelarutan gas	
2	Warna	Umumnya abu-abu gelap atau hitam pekat (tergantung kandungan limbanya)	-

3	Bau	1 Baunya mirip oli, relatif tidak menyenangkan, 2 Menyebarkan gas H₂S dan gas lainnya tergantung produk buangan	-
4	Kekeruhan	Dikarenakan oleh berbagai jenis partikel yang terdispersi.	-
5	Suspended	Partikel yang terlarut dalam air terdiri dari bahan organik dan anorganik yang dapat dipisahkan menggunakan kertas millipore dengan pori berukuran 0,45 µm.	30
6	Bahan organik	Campuran yang tidak homogen dari berbagai senyawa organik. Unsur-unsur utama yang terkandung di dalamnya meliputi protein, karbohidrat, dan lipid.	
	BOD	Pengukuran dilakukan selama 5 hari untuk mengevaluasi fraksi biodegradasi senyawa organik karbon. Penelitian ini melibatkan pengukuran konsumsi oksigen yang terjadi setelah periode 5 hari akibat aktivitas mikroorganisme dalam proses stabilisasi biokimia bahan organik.	30
	COD	Mewakili jumlah oksigen yang diperlukan untuk menstabilkan bahan organik yang mengandung karbon melalui reaksi kimia. Proses	100

		ini dilakukan dengan menggunakan agen pengoksidasi yang kuat dalam lingkungan asam.	
7	Nitrogen	Total nitrogen mencakup nitrogen organik, amonia, nitrit, dan nitrat. Nutrisi ini sangat penting bagi pertumbuhan mikroorganisme dalam proses pengolahan air limbah secara biologis.	10
8	Tingkat keasaman (pH)	Indikator untuk menentukan kondisi air limbah yang bersifat asam atau basa dapat diukur menggunakan skala pH. Larutan yang memiliki pH 7 dianggap netral.	6-9
10	Minyak dan lemak	Fraksi bahan organik yang dapat larut dalam air berasal dari limbah domestik, khususnya dari minyak dan lemak yang digunakan dalam proses memasak makanan.	5

Sumber: (Arceivala, 1981)(Qasim, 2019)(Metcalf et al., 2003), (Permen LHK, 2016)

2.1.3. Dampak air limbah

2.1.3.1. Dampak sosial dan kesehatan

Air yang tercemar memiliki konsekuensi serius bagi kesehatan manusia. Berdasarkan laporan UNESCO mengenai pengembangan air global tahun 2021, diperkirakan sekitar 829.000 individu meninggal setiap tahun akibat diare yang disebabkan oleh air minum yang tidak aman, sanitasi yang buruk, dan kurangnya kebersihan tangan. Dari jumlah tersebut, hampir 300.000 adalah anak-anak di bawah lima tahun, yang menyumbang 5,3 persen dari total kematian dalam

kelompok usia tersebut. Data yang diperoleh dari Palestina menunjukkan bahwa individu yang mengonsumsi air tanpa pengolahan lebih rentan terhadap penyakit seperti diare dibandingkan mereka yang menggunakan air minum hasil desalinasi dan sistem penyaringan rumah tangga (Abuzerr et al., 2019). Kekurangan akses terhadap layanan air dan sanitasi berkontribusi pada meningkatnya insiden penyakit seperti kolera, trachoma, schistosomiasis, dan infeksi cacing. Penelitian menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara kolera dan air yang terkontaminasi. Selain itu, konsumsi air minum yang tidak aman serta kondisi sanitasi yang buruk dapat memicu penyakit saluran pencernaan, mengganggu penyerapan nutrisi, dan menyebabkan malnutrisi, dengan dampak yang lebih serius pada anak-anak. Jika pencemaran air terus berlanjut, berbagai penyakit seperti diare, penyakit kulit, dan kanker dapat muncul.

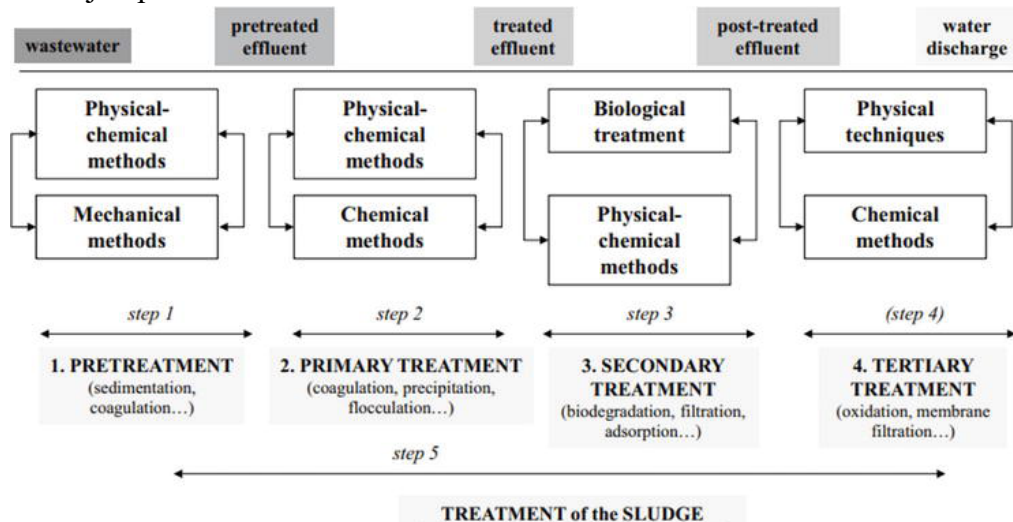
2.1.3.2.Dampak ekonomi

Pertumbuhan ekonomi dan polusi air secara intrinsik terkait satu sama lain. Hampir semua bentuk produksi menciptakan polusi sebagai produk sampingan. Karena air dibutuhkan untuk kehidupan, kesehatan, dan produksi ekonomi. Kotoran yang dihasilkan oleh pencemar di hulu dapat mempengaruhi pengguna di hilir. Dengan pemahaman bahwa menghilangkan semua polusi air terlalu mahal dan tidak mungkin dilakukan, regulator dan pembuat kebijakan harus membuat keputusan tentang tingkat polusi air yang sesuai (Russ et al., 2022).

Untuk mengambil keputusan ini, harus memiliki informasi yang akurat tentang biaya sebenarnya dari polusi air, yang mungkin sulit dipahami karena beberapa alasan. Pertama, ada tantangan dengan identifikasi. Baik manfaat maupun biaya berasal dari sumber aktivitas ekonomi dan pencemaran yang sama sehingga menyulitkan untuk mengisolasi dan mengukur dampak ekonomi makro. Pendekatan yang menghubungkan polusi air dengan PDB besar kemungkinan akan memiliki dampak positif dan negatif (Russ et al., 2022).

2.2. Degradasi Zat Pencemar pada Air Limbah

Degradasi zat pencemar dalam air limbah dapat dikategorikan ke dalam tiga tahap, yaitu fisik, kimia, dan biologi. Untuk penjelasan lebih rinci, silakan merujuk pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses utama pada degradasi air limbah

Sumber: (De Sanctis et al., 2017)

2.2.1. Proses degradasi fisika, kimia dan biologi

2.2.1.1. Degradasi fisika pada air limbah

2.2.1.1.1. Pengolahan secara fisik

Pengolahan air limbah fisik adalah langkah pertama dalam pengolahan limbah industri dan sanitasi, yang selain meningkatkan efisiensi langkah lain, mencegah kerusakan pada peralatan yang digunakan dalam pengolahan kimia dan biologi. Peralatan dan proses yang digunakan dalam pengolahan air limbah fisik bervariasi sesuai dengan jenis limbah dan kualitas air limbah yang diinginkan. Dengan kata lain, karena air limbah sebagian besar sangat berwarna dan mengandung oksigen biologis dan kimiawi yang tinggi, mereka memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan dianggap basa secara kimiawi. Dengan kata lain, karena air limbah sebagian besar sangat berwarna dan mengandung oksigen biologis dan kimiawi yang tinggi, mereka memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan dianggap basa secara kimiawi. Dengan demikian, parameter yang berbeda mempengaruhi biaya pemilihan metode pengolahan air limbah. Faktor-faktor seperti jenis polutan yang akan diolah, komposisi kimia air limbah, biaya bahan

kimia yang diperlukan, biaya operasi, biaya pengumpulan limbah yang dihasilkan oleh proses pengolahan, mempengaruhi pemilihan metode pengolahan air limbah (Kalbar et al., 2012).

Proses pengolahan fisik adalah metode pengelolaan limbah yang bertujuan untuk menghilangkan polutan melalui teknik fisika, seperti sedimentasi dan penyaringan. Prinsip dasar dari pengolahan limbah secara fisik adalah untuk menghapus partikel padat yang terlarut dalam air. (Riffat, 2015).

Metode pengolahan fisik meliputi proses sedimentasi dan filtrasi.

1. Sedimentasi

Sedimentasi adalah proses di mana partikel-partikel yang terlarut dalam air terpisah. Partikel-partikel tersebut memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan air. Proses sedimentasi dapat dianggap sebagai gangguan yang mempengaruhi gaya gravitasi, yang disebabkan oleh perbedaan antara partikel yang terlarut dan polusi yang ada (Karlson, 1998). Saat ini, metode sedimentasi di industri terus mengalami pengembangan melalui modifikasi pada tangki sedimen. Salah satu pendekatan yang diambil adalah dengan melakukan modifikasi pada pusran di dalam tangki tersebut. Penyesuaian pusran ini telah terbukti meningkatkan efisiensi proses sedimentasi (Ochowiak et al., 2017).

2. Penyaringan (Filtrasi)

Penyaringan dalam pengolahan air merupakan tahap tersier yang dilakukan setelah proses sekunder, seperti sedimentasi, koagulasi, dan penggunaan lumpur teraktivasi. Proses filtrasi ini berfungsi untuk memisahkan sebagian besar partikel tersuspensi, sehingga meningkatkan efektivitas tahap disinfeksi (Fayyad et al., 2022).

2.2.1.2. Degradasi biologis pada air limbah

Proses pengolahan limbah secara biologis melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk menguraikan atau menghilangkan kontaminan. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk mengurangi dan menghilangkan bahan organik yang dapat terurai dari limbah air hingga mencapai tingkat yang sesuai dengan

batas yang telah ditetapkan. Selain itu, pengolahan biologis juga berfungsi untuk menghilangkan nitrogen dan fosfor dari air limbah (Riffat, 2015). Beberapa teknik yang diterapkan dalam pengolahan biologis mencakup biofiltrasi dan proses lumpur aktif.

1. Trickling Filter

Trickling filter dan percolating filter merupakan metode pengolahan sekunder yang diterapkan pada air limbah domestik. Proses biofilter ini menghasilkan air dengan kualitas yang tinggi (Maurya et al., 2020). Dalam biofilter, mikroorganisme ditempatkan pada media berpori untuk menguraikan polutan yang terdapat dalam aliran air limbah. Mikroorganisme tersebut berkembang dalam bentuk biofilm di permukaan media atau terlarut dalam fase air yang mengelilingi partikel media. Efektivitas biofilter dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti inokulasi mikroba, pH, suhu, kelembaban, dan kandungan nutrisi (Srivastava et al., 2008).

2. Lumpur aktif

Lumpur aktif adalah suatu teknik yang memanfaatkan populasi bakteri yang terlarut dalam limbah cair dalam kondisi aerobik. Dalam keadaan di mana nutrisi dan oksigen tersedia tanpa batas, laju pertumbuhan dan respirasi bakteri akan meningkat secara signifikan (Samer, 2015). Aktivitas dari lumpur teraktifasi dapat ditingkatkan salah satunya dengan menambah enzim fungi. Penambahan enzim fungi dilakukan pada lumpur aktif untuk degradasi zat warna pada limbah cair industri tekstil. Penambahan enzim pada lumpur teraktifasi terbukti dapat meningkatkan aktivitas dari lumpur aktif, jumlah pengendapan dan warna yang hilang meningkat dari 75% menjadi 95%.

2.2.1.3.Degradasi kimia pada air limbah

Proses pengolahan air limbah secara kimia merupakan metode yang melibatkan penggunaan bahan kimia untuk memodifikasi atau menghilangkan zat pencemar (Riffat, 2015). Proses pengolahan limbah air secara kimia meliputi metode koagulasi dan adsorpsi. Koagulasi merupakan teknik yang digunakan untuk mengagregasi partikel-partikel kecil dalam air limbah, sehingga membentuk flok yang lebih besar dan mudah diendapkan.

1. Koagulasi

Koagulasi merupakan proses penggumpalan partikel koloid melalui penambahan bahan kimia, yang mengakibatkan partikel-partikel tersebut menjadi netral dan membentuk endapan akibat gaya gravitasi. Tujuan dari koagulasi adalah untuk mengubah partikel padatan dalam air baku yang awalnya tidak dapat mengendap menjadi lebih mudah mengendap. Proses ini terjadi ketika koagulan dicampurkan ke dalam air baku, sehingga partikel padatan yang ringan dan berukuran kecil menjadi lebih berat dan membentuk agregat (flok) yang lebih besar, sehingga dapat dengan mudah mengendap (Susanto, 2008).

Proses koagulasi melibatkan tahap pengadukan antara koagulan dan air baku serta netralisasi muatan. Prinsip dasar koagulasi adalah bahwa air baku mengandung partikel-partikel padatan yang sebagian besar memiliki muatan negatif. Partikel-partikel ini cenderung saling tolak-menolak, sehingga tetap stabil dalam bentuk suspensi atau koloid di dalam air. Untuk menetralkan muatan negatif dari partikel padatan, koagulan yang bermuatan positif ditambahkan ke dalam air, diikuti dengan pengadukan yang cepat (Susanto, 2008).

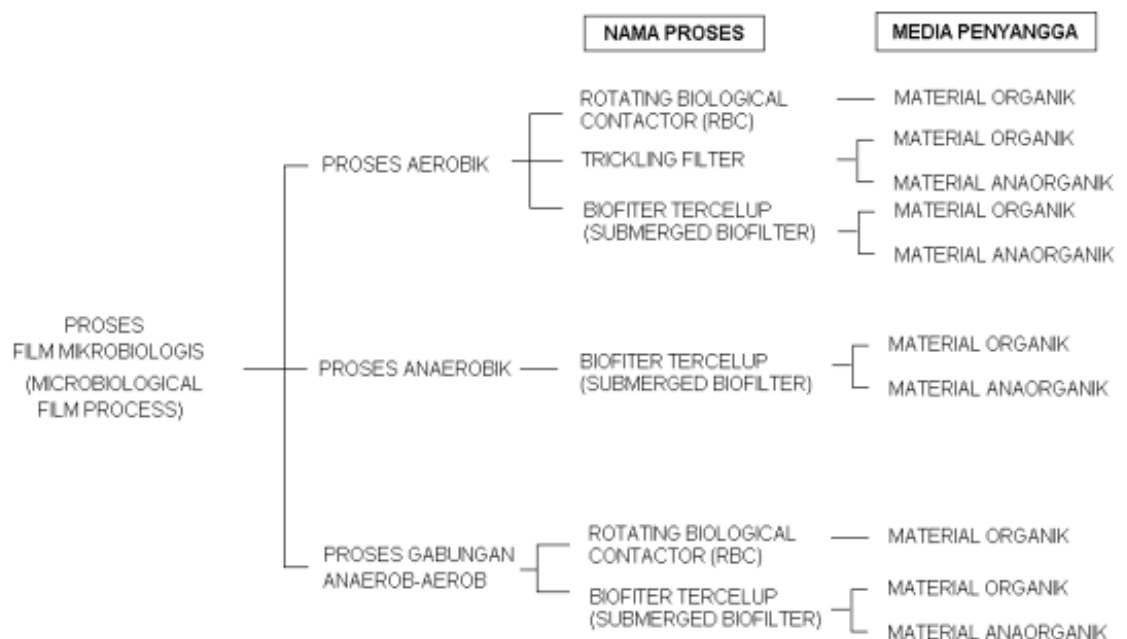
2. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu proses di mana molekul terlarut (adsorbat) dihilangkan dengan cara melekatkan adsorbat pada permukaan adsorben. Adsorben yang digunakan harus memiliki luas permukaan yang besar, contohnya termasuk alumina, tanah liat, hidroksida, resin, dan karbon aktif. Berbagai faktor mempengaruhi proses adsorpsi, seperti diameter partikel, konsentrasi adsorbat, suhu, berat molekul, dan pH (Samer, 2015). Salah satu contoh penerapan adsorben dalam pengolahan air limbah adalah ZSM-5. ZSM-5 yang dibuat dari kaolin dimanfaatkan untuk menghapus zat warna dari limbah tekstil.

Proses adsorpsi terjadi ketika padatan atau molekul gas atau cair berinteraksi dengan molekul adsorbat, yang menghasilkan gaya kohesif, gaya hidrostatik, dan gaya ikatan hidrogen antara molekul-molekul dalam material

tersebut. Ketidakseimbangan gaya-gaya ini menyebabkan perubahan konsentrasi molekul pada antarmuka antara zat padat dan fluida. Molekul fluida yang diserap tetapi tidak terikat pada permukaan adsorben dikenal sebagai adsorptif, sedangkan yang terikat disebut adsorbat. Proses adsorpsi menggambarkan pergerakan molekul dari larutan menuju permukaan zat adsorben sebagai akibat dari reaksi kimia dan fisika. Keberhasilan proses adsorpsi dipengaruhi oleh karakteristik zat padat yang melakukan adsorpsi, sifat molekul yang diserap, serta faktor-faktor seperti konsentrasi dan suhu (Khairunisa, 2008).

2.2.2. Degradasi zat pencemar pada air limbah secara biologis pada air limbah



Gambar 2. Jenis pengolahan secara biologi

Sumber: (Said, 2000)

2.2.2.1. Kontaktor biologis berputar

Kontaktor biologis berputar banyak digunakan dalam pengolahan air limbah domestik dan industri. Teknologi ini menjadi alternatif untuk metode konvensional lumpur aktif dalam pengolahan air limbah. Sistem kontaktor

berputar menawarkan stabilitas proses pengolahan, konsumsi energi listrik yang rendah, waktu detensi yang singkat, biaya operasional yang efisien, serta kemudahan dalam pengoperasian (Szulzyk-Cieplak et al., 2018).

Kontaktor biologis berputar terdiri dari beberapa cakram paralel yang dipasang secara tegak lurus pada poros dan berputar perlahan (sekitar 1 hingga 1,6 putaran per menit) di dalam tangki yang berisi air limbah yang akan diproses. Sebagian dari unit kontaktor biologis berputar terendam dalam tangki (umumnya sekitar 40%). Dua parameter desain utama untuk kontaktor biologis berputar adalah laju pemuatan hidraulik dan laju pemuatan organik.

Saat ini, penggunaan kontaktor biologis berputar menjadi metode yang dipilih dalam pengolahan air limbah baik dari sektor kota maupun industri, karena kemampuannya dalam mengolah bahan organik dengan konsentrasi COD yang berkisar antara 600 hingga 2000 mg/L. Biomassa yang terdapat pada cakram kontaktor biologis berputar memainkan peran sentral dalam proses biodegradasi bahan organik (Su et al., 2015). Kontaktor biologis berputar memiliki sejumlah keunggulan, termasuk waktu detensi yang singkat, konsumsi energi yang minimal, konsentrasi biomassa yang tinggi, kemampuan untuk menangani berbagai jenis aliran, serta menghasilkan limbah lumpur yang rendah (Ebrahimi et al., 2018). Efisiensi biodegradasi dalam kontak biologis berputar dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kadar oksigen terlarut dalam air limbah, laju aliran air limbah, konsentrasi senyawa organik, kecepatan rotasi, serta konfigurasi sistem, yang mencakup metode distribusi cairan dan kondisi aerasi (Szulzyk-Cieplak et al., 2018).

Biasanya dipasang pada poros horizontal dan sebagian atau seluruhnya terbenam dalam air limbah, unit kontaktor biologis berputar terdiri dari sejumlah cakram datar besar atau beton. Sebagai alternatif cakram tradisional, tangki yang penuh dengan penyangga ringan dapat digunakan. Dengan membiarkan biofilm tumbuh di permukaan media, poros yang terus berputar—didukung oleh penggerak air bertekanan atau motor mekanis—membantu memecah bahan organik dalam air limbah. Media yang berputar menjaga biomassa dalam keadaan aerobik dan meningkatkan transfer oksigen dalam proses aerobik. Lebih jauh, turbulensi yang

dihasilkan oleh pemintalan pada permukaan yang keras membantu pembuangan padatan ekstra dari media (Ito et al., 2019). Mikroorganisme yang umum digunakan, seperti bakteri, alga, protozoa, jamur, dan lain-lain, tumbuh menempel pada permukaan media yang berputar dan dapat membentuk lapisan yang dikenal sebagai biofilm (lapisan biologis). Jumlah molekul organik dalam air limbah dapat dikurangi atau dihilangkan oleh mikroorganisme, yang juga dapat menyerap oksigen dari udara atau terlarut di dalamnya untuk proses metabolismenya (Singh et al., 2012).

2.2.2.2. Trickling Filter

Dengan metode Trickling Filter, air limbah diolah dengan cara menyebarkan udara limbah ke dalam tumpukan atau akuarium yang terbuat dari bahan keramik, plastik, terak dari tungku, batu pecah, atau media lainnya. Hasilnya, lapisan biologis (biofilm) akan terbentuk di permukaan media, menyerupai lendir. Lapisan ini akan bersentuhan dengan air limbah dan memecah polutan yang ada di dalamnya. Mikroorganisme berkembang dan menempel pada permukaan media pendukung dalam sistem trickling filter, yang pada dasarnya merupakan proses yang sama dengan sistem lumpur aktif untuk mengolah air limbah.

2.2.2.3. Biofiltrasi

Mikroorganisme berkembang biak di seluruh permukaan media dalam reaktor biofilter. Udara yang mengandung polutan memasuki sistem melalui lubang-lubang media dan bersentuhan langsung dengan biofilm, atau lapisan massa mikroba. Lapisan zoogleal, biofilm yang terdiri dari bakteri, jamur, alga, dan protozoa, terbentuk di lapisan paling atas media (Eighmy et al., 1983). Menurut Metcalf dan Edy, sel bakteri merupakan sel yang paling signifikan dan sering digunakan dalam prosedur pengolahan air limbah; oleh karena itu, sel mikroorganisme lain dapat dianggap memiliki struktur yang mirip dengan bakteri. Proses pembentukan biofilm dalam air limbah identik dengan yang terjadi di alam. Zat organik dalam air akan diurai oleh mikroorganisme dalam biofilm. Kondisi anaerobik tercipta di lapisan biofilm atas akibat lapisan biofilm yang lebih tebal menyebabkan transmisi oksigen yang lebih sedikit ke lapisan biofilm di bawahnya

(Metcalf et al., 2003). Mekanisme yang terjadi pada reaktor melekat diam terendam adalah :

1. Transportasi dan adopsi zat organik dan nutrisi dari fasa cair ke fasa biofilm
2. Transportasi mikroorganisme dari fasa liquid ke fasa biofilm
3. Adsorpsi mikroorganisme yang terjadi dalam lapisan biofilm
4. Reaksi metabolisme mikroorganisme yang terjadi dalam lapisan biofilm, memungkinkan terjadinya mekanisme pertumbuhan, pemeliharaan, kematian dan lisis sel.
5. Attachment dari sel, yaitu pada saat lapisan biofilm mulai terbentuk dan terakumulasi secara batch dan bertahap pada lapisan biofilm.
6. Mekanisme pelepasan (detachment biofilm) dan produk lainnya (by product).

Saat lendir terbentuk, bakteri akan terus berkembang biak di dalamnya, sehingga ketebalannya bertambah. Makanan dan oksigen akan berdifusi hingga mencapai ketebalan maksimalnya. Makanan dan oksigen tidak dapat lagi mencapai permukaan padat atau bagian terjauh dari fase cair dalam keadaan ini. Lapisan aerobik dan lapisan anaerobik adalah dua bagian dari lapisan biomassa yang dihasilkan dari hal ini. Lapisan biomassa akan terkelupas jika lapisan biofilm menebal karena daya rekat mikroorganisme pada media pendukung tidak akan cukup kuat untuk menahan gravitasi lapisan biofilm. Pada bagian yang terkelupas ini, koloni mikroba baru akan tumbuh saat lapisan biofilm terbentuk. Erosi cairan yang berlebihan yang melewati biofilm juga dapat menyebabkan terkelupasnya. Semakin tinggi lapisan maksimal dan semakin tebal lapisan anaerobik, semakin buruk proses efisiensi aerobiknya. Hanya lapisan luar, yang tebalnya antara 0,05-0,15 mm, yang merupakan lapisan aerobik, meskipun lapisan biomassa tebalnya beberapa milimeter.

Beberapa sumber air limbah yang digunakan dalam penelitian terkait biofilter dan kemampuannya untuk mengurangi kebutuhan oksigen biologis dan kimia sebesar 43,75% menggunakan air limbah kota (Bezirgiannidis et al., 2019; Ibrahim et al., 2020; Malakootian et al., 2021). Menarik juga untuk mengetahui bahwa biofiltrasi juga dapat diterapkan pada air limbah kilang minyak dengan

waktu 170 hari menggunakan media plastik dalam skala lab, dapat menurunkan Permintaan oksigen kimia hingga 46% (Nogueira et al., 2016). Tidak hanya itu, ditemukan juga bahwa penggunaan sampah berumur setebal 80 cm selama 12 bulan dalam studi skala percontohan mampu menurunkan kebutuhan oksigen biologis sebesar 99% dan kebutuhan oksigen kimia sebesar 98% (Youcai et al., 2002)

Temuan menarik lainnya adalah 69% data menunjukkan bahwa penelitian biofiltrasi untuk mengurangi kebutuhan oksigen biologis dan kimia dilakukan selama lebih dari 10 hari. Dengan waktu penelitian paling lama 460 hari, media yang digunakan adalah kompos dengan sumber air limbah berupa cheese whey skala lab dengan ketebalan 0,15 m dan hasil yang diperoleh menurunkan biological oxygen demand sebesar 70-80%, chemical oxygen demand sebesar 80-88% (Merlin et al., 2009), studi lebih lanjut menggunakan air limbah sekolah dengan waktu penelitian lebih dari 12 bulan pada skala pilot menggunakan media pasir, kerikil, dan kasar dengan ketebalan berbeda menghasilkan penurunan 98% kebutuhan oksigen biologis dan 96% kebutuhan oksigen kimia. Uniknya, meski 69% penelitian dilakukan dalam waktu lama, penelitian dalam waktu singkat juga mampu menurunkan chemical oxygen demand sebesar 80-90% dengan menggunakan air limbah winery selama 8 hari skala lab dengan 75 liter air (Pipolo et al., 2017).

Beberapa jenis media ditemukan dalam proses biofiltrasi untuk mengurangi kebutuhan oksigen biologis dan kimia, termasuk pasir (Ibrahim et al., 2020), kerikil, kasar, sampah tua, corbicula fluminea, cincin pengabuan, plastik, tanggal kernel, pozzolan dan serbuk gergaji, kompos cacing, ragi, dan kompos (Youcai et al., 2002; Merlin et al., 2009; Rabah et al., 2011; Ferraz et al., 2014; Kumar et al., 2015, 2015; Nogueira et al., 2016; Pipolo et al., 2017; Bezirgiannidis et al., 2019; Ouadi et al., 2020; Subramanian et al., 2020; Malakootian et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa berbagai jenis media dengan berbagai ketebalan dapat mengurangi kebutuhan oksigen biologis dan kimiawi. menariknya, pasir, kerikil dan pasir kasar adalah media terbaik untuk mengurangi kebutuhan oksigen biologis (98%) dan kebutuhan oksigen kimia (96%) dibandingkan dengan media lain, tanpa mempertimbangkan jenis air limbah yang diolah (Subramanian et al., 2020). Hal

ini tentunya membutuhkan kajian yang lebih mendalam media mana yang paling baik digunakan sebagai media biofilter dengan melihat jenis sumber air limbah yang sama.

Pengurangan kebutuhan oksigen biologis dan kimiawi terbaik terjadi pada penggunaan media pasir, kerikil dan kasar yaitu masing-masing sebesar 98% dan 96% pada air limbah sekolah dengan ketebalan 0,6 m dengan masa percobaan lebih dari 12 bulan (Subramanian et al., 2020). Pengurangan yang besar ini juga terjadi pada media sampah tua dengan penurunan kebutuhan oksigen biologis dan kimia masing-masing sebesar 99% dan 98% dengan menggunakan limbah lindi setebal 80 cm selama 12 bulan (Youcai et al., 2002). Hal berbeda ditunjukkan oleh biofilter dengan media plastik yang mencoba menurunkan chemical oxygen demand pada air limbah kilang minyak selama 170 hari hanya dengan penurunan chemical oxygen demand sebesar 46% (Nogueira et al., 2016). Kemungkinan ini terjadi karena jenis limbah yang berbeda dan lebih pekat dibandingkan dengan limbah lain dengan kepadatan yang berbeda, sehingga biofilter tidak mampu secara maksimal mereduksi polutan dalam limbah.

Penelitian yang dilakukan oleh Dorji et al. (2022) menyatakan bahwa setelah dilakukan studi skala pilot selama 262 hari pada suhu rata-rata 23,4°C menggunakan botol plastik (PET dan PP), dimana total kandungan padatan tersuspensi hilang hingga 80%. Selain itu, penelitian yang sama menunjukkan bahwa media plastik juga dapat menghilangkan *E. coli* hingga 92,4% (Dorji et al., 2022). Total padatan tersuspensi juga bisa menjadi sumber logam berat yang baik dan (Gao et al., 2015; Liu et al., 2016). Hal ini tentunya sangat berbahaya bagi air jika zat tersebut terdapat pada air limbah.

Selain media yang terbuat dari plastik sebenarnya ada beberapa media yang mampu menurunkan *E. coli* salah satunya yang diungkapkan pada penelitian Gomes et al. (2018) menunjukkan bahwa *Corbicula fluminea* yang dimanfaatkan sebagai media pada reaktor biofiltrasi dapat membantu mengonsumsi bakteri *Escherichia coli* dari air yang terkontaminasi. Akan tetapi temuan lain mengarah pada bahwa media dapat jenuh untuk mengurangi *E. coli* pada air limbah seperti yang dinyatakan dalam penelitian Mohanty et al. (2014) yang menyebutkan bahwa penghilangan

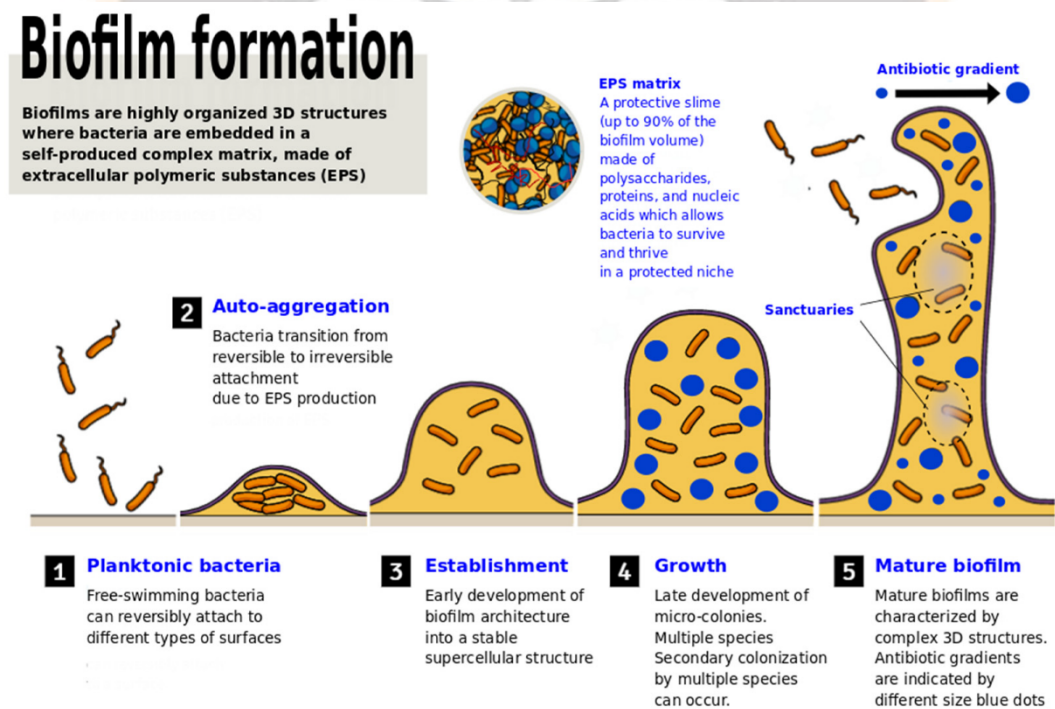
bakteri dalam model biofilter augmented biochar tidak mempengaruhi konsentrasi influen *E. coli*. Pada konsentrasi $\sim 10^7$ CFU mL⁻¹, penyisihan menurun menjadi 91%, menunjukkan bahwa beberapa bagian media mungkin sampai pada titik jenuh untuk menurunkan *E. coli*.

Penggunaan biofilter untuk mengolah air limbah pada dasarnya melibatkan pengarahannya ke dalam reaktor biologis untuk diproses. Media penyangga, yang berfungsi untuk mengembangbiakkan mikroorganisme, sebelumnya telah ditambahkan ke reaktor biologis ini. Sistem biofilter ini dapat dioperasikan secara aerobik, anaerobik, atau campuran keduanya. Baik oksigen maupun air tidak digunakan dalam proses anaerobik. Di sisi lain, oksigen perlu ditambahkan jika proses dilakukan secara aerobik. Namun, sistem aerobik biasanya digunakan saat beban pemrosesan tidak terlalu tinggi. Akibatnya, sistem anaerobik biasanya digunakan sebelum beralih ke sistem aerobik.

Mikroorganisme akan tumbuh dan berkembang pada media pendukung yang digunakan dalam proses biofilter. Ada banyak jenis media tempat mikroba dapat menempel atau tumbuh, termasuk media kerikil dan plastik. Selain itu, air limbah yang bersentuhan dengan media—baik yang terendam maupun yang hanya lewat—membentuk lapisan seperti lendir yang menempel pada media, menyebabkan biofilm tumbuh di atasnya (Hadiwidodo et al., 2012). Proses biofilter dipilih sebagai teknologi pengolahan air limbah karena manfaatnya. Dijelaskan oleh Herlambang, A., (2016) bahwa Di antara kelebihan pengolahan air limbah dengan biofilter adalah efisiensi dekomposisi biologisnya yang relatif tinggi. Akan tetapi, seberapa efektif biofilter tersebut, ditentukan oleh banyaknya air limbah yang terdapat mikroorganisme yang menempel pada material filter yang dipilih. Kandungan organik limbah udara dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan secara efektif oleh biofilter. Sistem biofilter dapat mengurangi atau menghilangkan berbagai macam zat, termasuk COD, BOD, amonia, partikel tersuspensi, fosfor, bahkan bakteri *E. coli*. Selain itu, teknologi biofilter ini mudah digunakan. Selain itu, biofilter ini dapat digunakan tanpa memerlukan bahan kimia atau energi yang besar. Pada hakikatnya, biofilter memiliki kekurangan dalam sistemnya di samping kelebihanannya. Efisiensi kinerja biofilter ini tidak selalu tinggi, yang menjadi salah

satu kekurangannya. Hal ini disebabkan oleh jenis dan komposisi media pertumbuhan yang ditempelkan berbeda-beda.

Butler dkk. (2014) menjelaskan prinsip pertumbuhan melekat (biofilm), yang menyatakan bahwa biofilm merupakan salah satu elemen atau mekanisme utama dalam konteks pertumbuhan mikroba yang melekat. Struktur biofilm rumit. Lingkungan tempat biofilm ditemukan sangat memengaruhi kumpulan sel beragam yang membentuk biofilm. Biofilm peka terhadap lingkungan sekitarnya. Intinya, sejumlah prasyarat berfungsi sebagai dasar untuk pengembangan atau perluasan biofilm, di mana permukaan, udara, dan nutrisi merupakan hal minimum yang dibutuhkan untuk pembentukan biofilm. Media, kolonisasi, dan pertumbuhan merupakan tahap umum yang dilalui oleh pembentukan biofilm. Struktur biofilm dapat dicirikan sebagai datar atau berserat, halus atau kasar, dan padat atau halus. Sejumlah variabel, seperti hidrodinamika sistem saat ini dan susunan kimia media di sekitarnya, memengaruhi struktur biofilm ini. Proses pembentukan biofilm pada permukaan media dapat dipengaruhi oleh jumlah nutrisi yang ada di udara. Pembentukan biofilm pada Gambar 3 dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 3. Mekanisme pembentukan biofilm

Sumber: (Meroni et al., 2021)

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan biofilm

1. Suhu dan pH

Perubahan jumlah dan kualitas mikroba sangat erat hubungannya dengan perubahan suhu. Laju reaksi enzimatik akan mendorong perbaikan suhu yang memungkinkan mikroba tumbuh lebih baik. Suhu optimal untuk pertumbuhan bakteri adalah 40°C (Ells et al., 2006). Diketahui juga bahwa perkembangan dan pertumbuhan bakteri dan biofilm sangat bergantung pada pH. Bakteri merespons perubahan pH baik secara internal maupun eksternal. pH optimal untuk pertumbuhan bakteri adalah 7, yang berlaku untuk hampir semua jenis bakteri (Oliveira et al., 1994).

2. Media Permukaan

Jenis permukaan media sangat mempengaruhi perlekatan bakteri. Pada tahap adhesi awal, kekasaran permukaan memiliki efek yang menguntungkan dalam meningkatkan daya rekat bakteri pada substrat dengan media adhesi yang lebih luas. Kasaran bakteri mengurangi kemungkinan bakteri yang menempel jatuh kembali ke dasar reaktor, yang dapat dipengaruhi oleh aliran laju air dan jenis bahan reaktor yang digunakan. Selain itu, beberapa faktor lain yang dapat mempengaruhi perlekatan bakteri pada biofilm adalah hidrofobik dan elastisitas (B.Prakash et al., 2003)

3. Kation Divalen

Adanya kation divalen (Ca^{2+}), baik di darat maupun di laut, merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pembentukan biofilm. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa eDNA berikatan dengan kation divalen, yang memiliki pengaruh besar pada perubahan bentuk permukaan sel, mendukung ketahanan biofilm terhadap berbagai zat seperti deterjen dan agen antimikroba (Mulcahy et al., 2008). Kalsium memiliki fungsi penting dalam pembentukan mikroba pada biofilm (De Kerchove et al., 2008). Dengan memasukkan kation divalen ternyata dapat menambah ketebalan biofilm awal yang terbentuk melalui proses normal dimana biofilm akan lebih padat dan stabil (Das et al., 2014). Selain sebagai kofaktor protein tertentu dalam pembentukan biofilm, kalsium juga berperan

sebagai signaling agent untuk virulensi biofilm dan regulasi alginate (Sarkisova et al., 2005).

4. DNA ekstraseluler (eDNA)

Telah dilaporkan juga bahwa DNA ekstraseluler (eDNA) merupakan komponen utama dari berbagai jenis biofilm, baik secara tunggal maupun dalam pembentukan multispecies (Böckelmann et al., 2006). Peran eDNA sangat penting pada setiap tahap pembentukan biofilm, meliputi adhesi, agregasi, bakteri awal, dan pembentukan mikrokoloni. Selain kalsium yang disebutkan sebelumnya mampu memperkuat biofilm, eDNA juga diketahui mampu memperkuat biofilm yang terbentuk dari antibiotik, gerakan berlebihan di dalam reaktor, dan detergen yang terbawa air limbah dan menjadi sumber makanan bagi biofilm itu sendiri (Das et al., 2013).

5. Quorum sensing (QS) dan regulasi gen

Banyak penelitian telah membuktikan bahwa regulasi gen yang diatur naik dan turun terjadi selama pembentukan biofilm *pseudomonas aeruginosa* (Steyn et al., 2001). Menariknya, dalam proses pembentukan biofilm *P. aeruginosa*, sintesis polifosfokinase dikendalikan oleh *algD* (B.Prakash et al., 2003). Biofilm berdasarkan *Staphylococcus aureus* diregulasi oleh gen yang menandakan enzim yang terlibat dalam glikolisis, seperti trifosfat, fosfoglisarat mutase, dan alkohol dehidrogenase (Huang et al., 2005; Xiong et al., 2010).

2.2.2.4. Fitoremediasi

Karena tanaman hijau, seperti tanaman berkayu seperti *Salix* spp. dan *Populus* spp. serta rempah-rempah seperti *Thlaspi Caerulescens*, *Brassica Juncea*, dan *Helianthus annuus*, dapat menghilangkan, menyerap, atau mengubah berbagai bahan kimia yang merusak lingkungan, termasuk logam berat, maka tanaman hijau digunakan dalam proses fitoremediasi. Selain itu, salah satu manfaat fitoremediasi adalah menurunkan kemungkinan kontaminasi yang meluas, yang dapat menyebabkan polusi yang tak berkesudahan (Mudhoo, et al., 2010). Proses fitoremediasi yang panjang dan fakta bahwa beberapa spesies tanaman tidak dapat tumbuh di lingkungan yang sangat terkontaminasi merupakan kekurangannya. Namun, manfaatnya adalah fitoremediasi dilakukan di tempat, tidak banyak

memerlukan tenaga kerja, murah, dan tidak mengganggu ekologi sekaligus menambah nilai estetika pada area tersebut.

Banyak negara telah mencoba metode ini dengan teknik yang berbeda-beda (Serrano-Mislata et al., 2017). Tumbuhan memiliki potensi untuk menurunkan kadar logam dalam polutan melalui kemampuan fitoekstraksi, fitostabilisasi, rhizofiltrasi, dan lain-lain (ITRC, 2009). *Kolonjono* (*Brachiaria mutica*) merupakan salah satu tumbuhan yang memiliki keunggulan dapat hidup pada kondisi tercemar, khususnya zat logam, dan dapat menyerapnya (Khasanah et al., 2019). Selain tumbuhan yang berperan dalam menurunkan kadar logam dalam udara tercemar, bakteri juga memiliki pengaruh dalam mendegradasi logam (Khadijah et al., 2018). Amonia yang merupakan polutan umum yang berbahaya bagi semua unsur merupakan salah satu kontaminan yang dapat diolah selain logam. Selain itu, sumbernya pun beragam, meliputi sumber rumah tangga, rumah sakit, dan industri (Asela, 2016). Lebih jauh lagi, pengobatan herbal dapat digunakan untuk memerangi TSS (Total Suspended Solid), salah satu kontaminan yang menurunkan kualitas udara (Bilotta et al., 2008).

2.2.2.5. Aerasi

Khususnya dalam pengolahan air limbah, ketika bakteri aerobik digunakan dalam proses pengolahan biologis, proses aerasi sangat penting. Jenis bakteri yang dikenal sebagai bakteri aerobik bergantung pada oksigen bebas untuk fungsi metabolismenya. Bakteri ini dapat berfungsi dengan baik jika ada cukup oksigen yang tersedia selama proses biologis. Menurut Sari et al., (2013). hal ini akan membantu menurunkan jumlah bahan organik dalam air limbah. Air secara alami mengangin-anginkan dirinya sendiri dengan berpindah dari satu badan air ke badan air lainnya. Aerator baki kerucut, aerator kaskade, dan air terjun adalah beberapa teknik yang banyak digunakan untuk meningkatkan aerasi alami. Untuk menciptakan kontak antara air dan air, aerasi mekanis, kadang-kadang disebut sebagai agitasi mekanis, melibatkan pengadukan dengan alat (Kasmidjo, 1991).

Proses aerasi bertujuan untuk membuat sebanyak mungkin kontak antara permukaan cairan dan air. Ini akan meningkatkan jumlah oksigen terlarut dalam air limbah, yang bermanfaat bagi kehidupan dan akan memfasilitasi pergerakan zat

atau komponen yang lebih efisien dari satu media ke media lainnya. Aspek terpenting dari proses ini adalah terjadinya turbulensi antara cairan dan air, yang mencegah adanya antarmuka yang stagnan atau diam antara cairan dan air yang dapat menghentikan laju perpindahan (Sari et al., 2013).

2.3. Degradasi zat pencemar menggunakan mikroorganisme lokal

MOL merupakan mikroba alami yang berfungsi sebagai media pertumbuhan mikroorganisme yang bermanfaat untuk mempercepat sintesis bahan organik (proses penguraian bahan organik menjadi kompos atau pupuk organik). MOL juga dapat menjadi nutrisi tambahan bagi tanaman di sekitarnya yang tumbuh karena adanya mikroba setempat. MOL merupakan larutan fermentasi yang dibuat dengan menggunakan berbagai bahan yang tersedia di daerah setempat. Unsur-unsur dasar tersebut dapat berasal dari sampah organik di rumah, perkebunan, atau hasil pertanian. Menurut Palupi, (2015) komponen utama MOL adalah sumber mikroba, glukosa, dan karbohidrat. Agar dapat dimanfaatkan dengan baik sebagai pengurai, biofertilizer, dan pestisida organik, mikroorganisme setempat (MOL) merupakan cairan fermentasi yang terbuat dari bahan alam yang mengandung mikroorganisme yang memiliki kemampuan mengubah bahan organik, perangsang tumbuh, hama, dan agen pengendali penyakit (Budiyan et al., 2016; Roeswitawati et al., 2018)

Mikro dan makronutrien hadir dalam larutan MOL, bersama dengan mikroba yang dapat memecah bahan organik, mendorong pertumbuhan, dan bertindak sebagai agen pengendali hama dan penyakit. Selain berfungsi sebagai sumber nutrisi, MOL dalam kompos juga berfungsi sebagai bagian dari bioreaktor, yang bertanggung jawab untuk menjaga kondisi terbaik bagi pertumbuhan tanaman. Bioreaktor dapat melakukan berbagai tugas rumit, termasuk menyalurkan nutrisi melalui mekanisme eksudat, mengelola mikroorganisme sesuai dengan kebutuhan tanaman, dan bahkan mengendalikan penyakit tanaman (Permana, 2011). Dalam sistem pertanian organik saat ini, MOL merupakan salah satu pengurai yang dapat digunakan untuk mengurai bahan organik dan saat ini sedang berkembang pesat. Sebagai alternatif, pupuk cair jenis MOL dapat digunakan untuk mendukung kebutuhan nutrisi tanah. Mikroorganisme dalam larutan MOL memiliki

kemampuan untuk mengurai bahan organik, merangsang perkembangan, dan mengendalikan hama serta penyakit tanaman. Hasilnya, mereka dapat digunakan sebagai pupuk hayati, insektisida organik, dan pengurai. Larutan MOL juga mengandung unsur hara makro dan mikro. Untuk menghasilkan produk pertanian berkualitas tinggi dan sehat serta mendukung pertanian berkelanjutan, MOL sangat penting bagi sistem pertanian organik (Kesumaningwati, 2018).

Agar larutan MOL dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mendorong pertumbuhan tanaman yang berkelanjutan, larutan tersebut harus berkualitas tinggi. Tingkat kualitas adalah tingkat yang menunjukkan sejumlah sifat bawaan dan memenuhi kriteria tertentu. Media fermentasi lainnya, jumlah bahan baku atau substrat, jenis dan bentuk mikroorganisme yang terlibat dalam proses fermentasi, pH, suhu, durasi fermentasi, dan rasio C/N larutan MOL merupakan faktor-faktor yang memengaruhi kualitas larutan (Seni et al., 2013). Mikroorganisme adalah makhluk hidup yang sangat kecil yang termasuk dalam kategori protista, yang meliputi bakteri, jamur, protozoa, dan alga. Untuk fungsi perkembangan dan metabolisme, semua bakteri yang dapat tumbuh pada substrat tertentu memerlukan sumber daya organik. Perubahan warna, kekeruhan, dan bau tidak sedap hanyalah beberapa contoh perubahan komposisi fisik dan kimia yang dapat dihasilkan oleh mikroorganisme yang tumbuh dan berkembang pada suatu zat (Darwis, 1992).

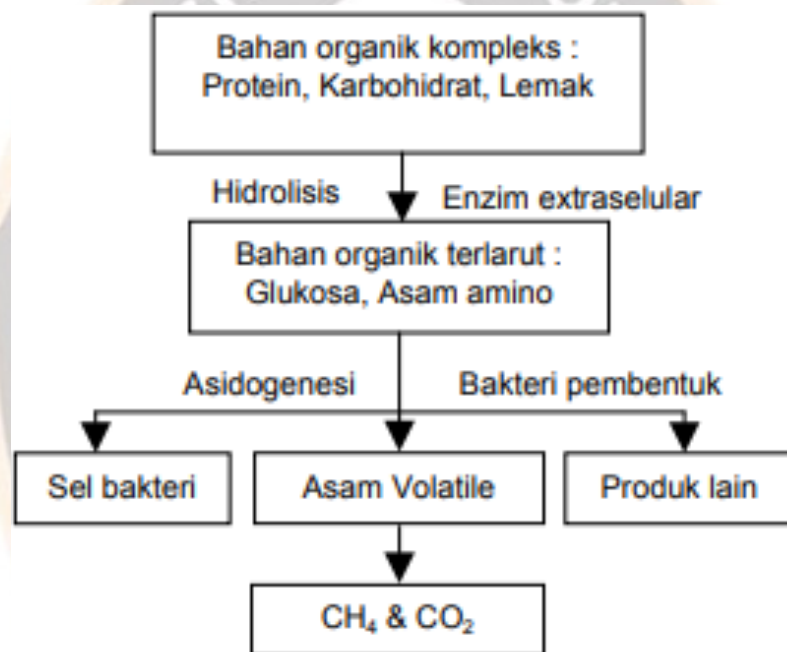
2.4. Plastik *polyethylene terephthalate* (PET)

Plastik merupakan polimer dengan sifat-sifat termoplastik, antikatrol, kuat tetapi ringan, dan dapat diwarnai. Menurut Elbana et al., (2012), menyatakan bahwa plastik dapat dibagi menjadi dua kategori: termoset dan termoplastik. Termoplastik, seperti polietilena, polipropilena, polistirena, dan polivinil klorida, merupakan plastik yang dapat berubah bentuk secara berkala jika dipanaskan. Akan tetapi, plastik termoset, seperti urea dan fenol formaldehida, tidak dapat dicairkan dengan pemanasan. Karena luas permukaannya yang besar untuk pertumbuhan biofilm yang melekat dan keuntungan finansialnya, jenis tutup botol plastik PET dapat dimanfaatkan sebagai media penyaring atau sebagai alternatif kerikil dalam pengolahan air limbah. PET merupakan polimer berbasis minyak bumi yang, seperti kebanyakan plastik, sulit terurai oleh lingkungan (Benyathiar et al., 2022).

Polietilena adalah bahan yang fleksibel, lembut, dan tembus cahaya dengan ketahanan sobek dan benturan yang baik. Pada suhu 110°C, polietilena akan meleleh dan menjadi lentur saat dipanaskan. Kekuatan tinggi, kekakuan, dimensi yang konsisten, ketahanan terhadap panas dan bahan kimia, serta kualitas listrik yang kuat adalah beberapa kualitas yang dimiliki PET. Penyerapan udara dan uap air sangat minimal dalam PET (Mujiarto, 2005).

2.5. Kinetika degradasi secara biologi

2.5.1. Mekanisme degradasi



Gambar 4. Degradasi anaerobik senyawa organik

Sumber: (Benefield dan Randall, 1980)

Berikut ini adalah penjelasan mengenai fase-fase yang terjadi dalam proses degradasi anaerobik yang ditunjukkan pada Gambar 4.

1. Proses hidrolisis memecah bahan-bahan rumit melalui aksi populasi bakteri saprofit.
2. Proses asidogenesis, di mana bakteri asidogenik mengubah substrat organik terlarut menjadi asam organik rantai pendek termasuk asam asetat, asam propionat, asam butirat, dan asam amino, antara lain.

3. Proses di mana bakteri metanogenik menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan gas metana (CH_4) dari asam organik yang mudah menguap dikenal sebagai metanogenesis.

2.6. Reaktor biodegradasi

2.6.1. Reaktor Moving Bed Biofilm Reactor

Teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) telah menjadi fokus perhatian dalam pengolahan limbah cair, terutama karena efisiensinya yang tinggi dan keserbagunaannya dalam menangani berbagai jenis limbah. MBBR menggunakan pembawa plastik tersuspensi yang menyediakan permukaan untuk pertumbuhan biofilm, yang memungkinkan proses pengolahan yang lebih efektif dibandingkan dengan metode konvensional. Sistem ini menggabungkan keunggulan dari sistem pertumbuhan tersuspensi dan sistem pertumbuhan melekat, yang menghasilkan peningkatan kinerja pengolahan dan efisiensi operasional (Madan et al., 2022a; Banti et al., 2023). Dengan kemampuan untuk mengolah limbah kota, industri, dan limbah dari akuakultur, MBBR menawarkan solusi yang fleksibel dan adaptif terhadap berbagai kondisi limbah yang berbeda (Gzar et al., 2021; Chalipa et al., 2024).

Salah satu keuntungan utama dari teknologi MBBR adalah efektivitas biayanya. Penelitian menunjukkan bahwa biaya operasional untuk mengolah limbah cair menggunakan MBBR dapat diperkirakan sekitar US\$ 0,15 per meter kubik, menjadikannya pilihan yang menarik bagi kotamadya dan industri yang ingin meningkatkan fasilitas pengolahan mereka dengan modal investasi minimal (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024). Keterjangkauan ini, dikombinasikan dengan kemampuan teknologi untuk meningkatkan kapasitas pengolahan volumetrik dari instalasi pengolahan air limbah yang ada, menjadikan MBBR sebagai alternatif yang sangat menarik dalam konteks pengelolaan limbah yang berkelanjutan (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024).

Lebih jauh lagi, sistem MBBR diketahui menghasilkan limbah berkualitas tinggi dengan pengurangan yang signifikan dalam permintaan oksigen biokimia (BOD) dan permintaan oksigen kimia (COD), yang merupakan parameter penting

dalam menilai efisiensi pengolahan air limbah (Chalipa, 2024; Madan et al., 2022). Dalam kondisi optimal, MBBR dapat mencapai efisiensi penghilangan nutrisi yang melebihi 90%, termasuk nitrogen dan fosfor, yang seringkali sulit dihilangkan dalam proses pengolahan konvensional (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024). Penelitian menunjukkan bahwa MBBR dapat beroperasi dengan baik dalam berbagai waktu retensi hidrolik (HRT), yang dapat disesuaikan untuk meningkatkan kinerja pemrosesan berdasarkan karakteristik spesifik air limbah yang masuk (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024).

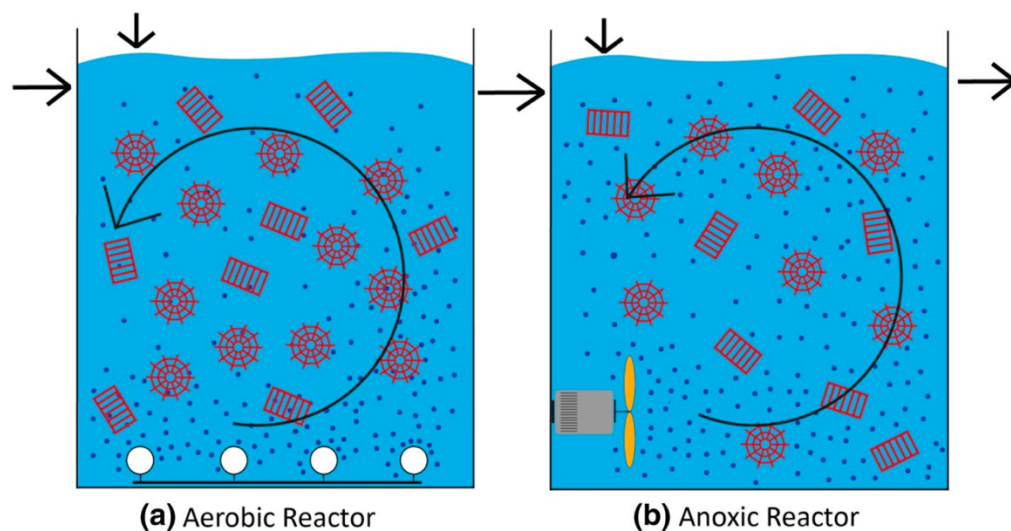
Fleksibilitas sistem MBBR juga memungkinkan untuk beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan, yang berkontribusi pada ketahanan dan stabilitas proses. Ini membuat MBBR cocok untuk mengolah aliran air limbah yang kompleks, termasuk yang mengandung bahan farmasi atau polutan industri (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024). Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa MBBR dapat berfungsi dengan baik dalam kondisi yang tidak terduga, seperti fluktuasi beban limbah, yang sering terjadi dalam pengolahan limbah industri (Chalipa, 2024; Madan et al., 2022). Dengan kemampuan untuk mempertahankan komunitas mikroba yang beragam, MBBR dapat meningkatkan efisiensi pengolahan dan mengurangi dampak lingkungan dari limbah yang dihasilkan ((Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024).

Dalam konteks pengolahan limbah cair, MBBR juga menunjukkan potensi untuk mengurangi biaya energi dan meningkatkan efisiensi operasional. Dengan memanfaatkan biofilm yang tumbuh pada pembawa, MBBR dapat mengurangi kebutuhan aerasi dan meningkatkan laju pengolahan. Penelitian menunjukkan bahwa dengan desain yang tepat, MBBR dapat beroperasi dengan biaya energi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem pengolahan konvensional lainnya, seperti activated sludge. Ini menjadikannya pilihan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair di berbagai sektor industri (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024).

Keberhasilan MBBR dalam mengolah limbah cair juga dapat dilihat dari kemampuannya untuk mengatasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam pengolahan limbah. Misalnya, MBBR telah terbukti efektif dalam mengurangi

kontaminan mikroplastik dan bahan berbahaya lainnya dari limbah cair, yang merupakan masalah lingkungan yang semakin mendesak. Dengan kemampuan untuk mengadaptasi proses pengolahan sesuai dengan karakteristik limbah yang berbeda, MBBR menawarkan solusi yang inovatif dan efisien untuk tantangan pengelolaan limbah di masa depan (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024).

Secara keseluruhan, teknologi MBBR menunjukkan potensi yang signifikan dalam pengolahan limbah cair, dengan keuntungan yang mencakup efisiensi biaya, fleksibilitas operasional, dan kemampuan untuk menghasilkan limbah berkualitas tinggi. Dengan terus berkembangnya penelitian dan pengembangan dalam bidang ini, MBBR diharapkan dapat memainkan peran kunci dalam pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan di berbagai sektor industri dan komunitas (Madan et al., 2022a; Chalipa et al., 2024). Bentuk reaktor MBBR ditampilkan pada gambar 5.



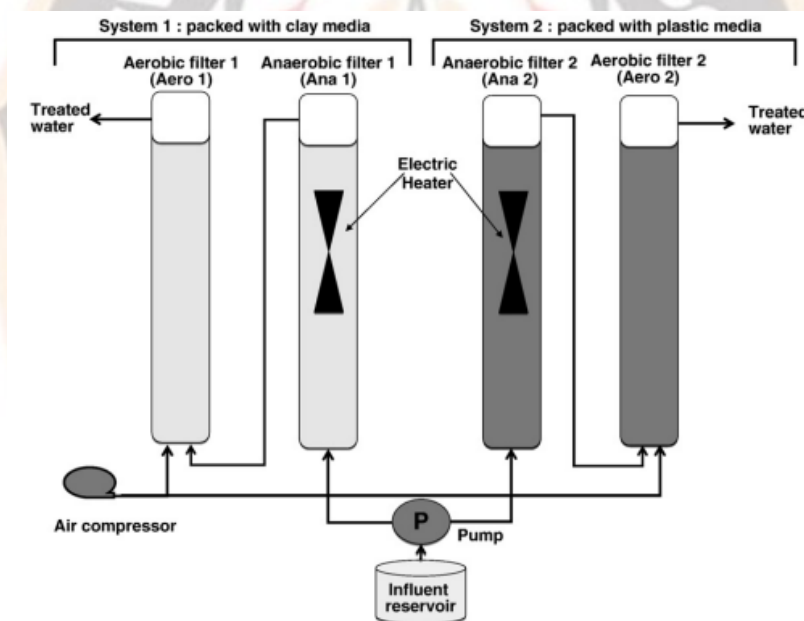
Gambar 5. Reaktor MBBR

Sumber: (Madan et al., 2022b)

2.6.2. Reaktor biofilter menggunakan plexiglas dengan sistem aerob dan anaerob

Pada penelitian (Rebah et al., 2010) dua sistem biofiltrasi beroperasi secara paralel. Setiap sistem termasuk dua reaktor terhubung secara seri (anaerob diikuti oleh reaktor aerobik). Seperti yang diilustrasikan pada Gambar. 5, air limbah

pertama kali dipompa ke filter anaerobik kemudian dilanjutkan filter ke aerobik. Pada sistem 1, setiap kolom terdiri dari kolom plexiglass (200 mm x 2 m) dikemas dengan media butiran tanah liat berukuran 20 hingga 60 mm volume efektif 15 L. pada sistem2 menggunakan media Ekotan (Québec, Kanada) terdiri dari kolom persegi panjang (200 mm x 1,4 m) berisi media kemasan plastik dengan volume efektif 29 L. Air terkompresi disuntikkan di bawah reaktor dan konsentrasi oksigen terlarut dipertahankan antara 5 dan 7 mg/L dengan memasukkan air dalam jumlah yang cukup. Pemanas listrik dulu dipasang di setiap reaktor anaerobik dan suhunya tetap sekitar 35 °C. Menurut penelitian ini dengan menggunakan reaktor biofilter dengan media plastik dapat menurunkan COD, BOD nitrogen dan fosfor dalam 142 hari. Desain reaktor disajikan pada gambar 6.



Gambar 6. Reaktor biofilter

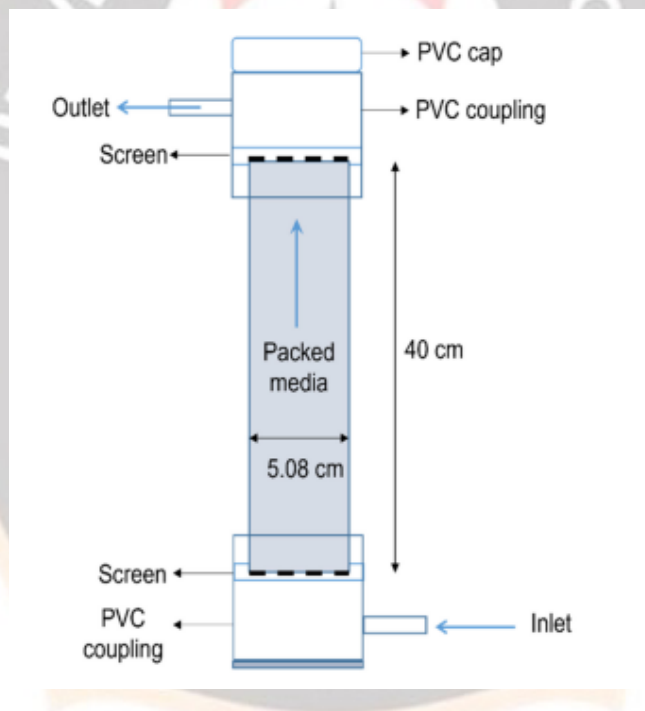
Sumber: (Rebah et al., 2010)

2.6.3. Reaktor biofilter dengan menggunakan media plastik dengan bentuk tabung memanjang

Sembilan bioreaktor skala laboratorium 0,8 L (Gambar 7) dibuat menggunakan diameter dalam 5,08 cm (2 inci) menggunakan pipa PVC. Bioreaktor ini diberi air limbah sintetik yang komposisinya telah dijelaskan oleh (Saliling et

al., 2007). Setiap bioreaktor panjangnya 40 cm dan ujungnya ditutup dengan jaring plastik untuk menahan media biofilter di dalam bioreaktor. Bagian atas pipa PVC dipasang PVC dan tutup (masing-masing berdiameter 5,08 cm), dan bagian bawah dipasang ke sambungan PVC lainnya. Lubang dibor pada dan dilengkapi dengan adaptor NPT (0,635 cm dan berduri) berfungsi sebagai inlet dan outlet. Tabung vinil bening (0,635 cm) dipasang pada inlet dan outlet bioreaktor untuk pengiriman air limbah.

Media plastik (Sweetwater SWX Bio-media, Pentair) polietena densitas tinggi, yang digunakan sebagai biofilter, juga diketahui dapat menghilangkan nitrat dari air limbah, dengan persentase penyusutan 92,57% (Paul et al., 2021). Desain reaktor disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Reaktor biofilter

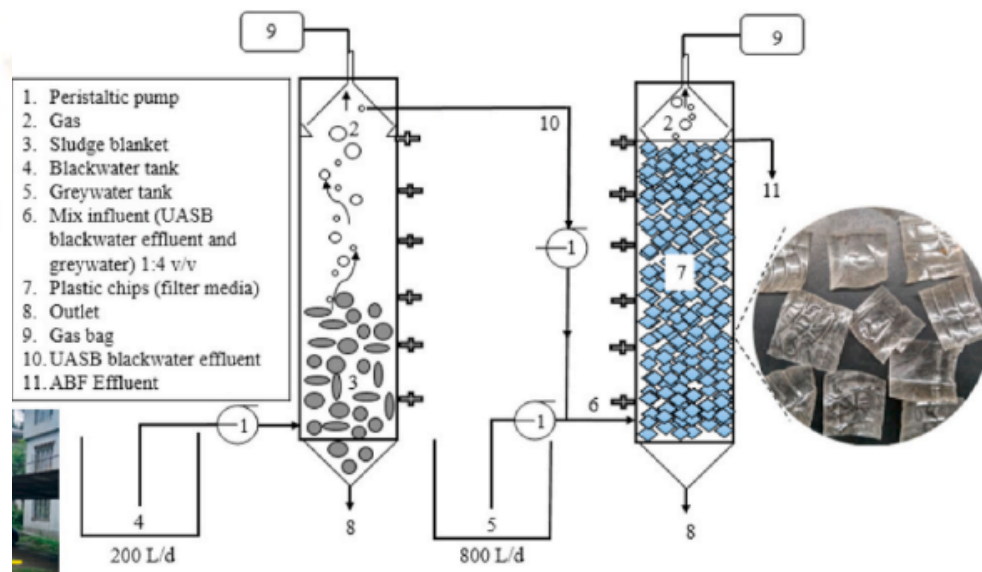
Sumber: (Paul et al., 2021)

2.6.4. Reaktor biofilter dengan sistem aerobik dan anaerobik dengan bentuk corong menggunakan media botol plastik PET

Reaktor biofilter terdiri dari dua tangki bioreaktor anaerobik: sebuah UASB diikuti oleh ABF yang terhubung secara seri. Bioreaktor kedua dibuat dari fiber rein

force glass masing-masing dengan volume hidrolis 595 L (tinggi 2 m dan diameter 0,6 m) dengan ketebalan dinding 4 mm. Basis reaktor berbentuk kerucut yang bertumpu pada beton semen biasa untuk memudahkan penyedotan. Pipa dan fitting yang diklorinasi polivinil klorida (CPVC) digunakan untuk masuk dan keluarnya air limbah. Sebuah deflektor stainless steel dan gas liquid-solid separator (GLSS) ditempatkan di bagian atas reaktor UASB. Di dalam bagian bawah ABF, pipa CPVC berbentuk persegi panjang membentuk kisi-kisi pipa dengan lubang yang dibor di bagian bawah (untuk mencegah penyumbatan pori-pori dengan lumpur)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Dorji et al, (2022) media plastik dengan reaktor biofilter seperti gambar dengan waktu 40 hari mampu menurunkan TSS 80%, *Bakteri Escherichia coli* 84,6–92,4 %, BOD 60-90%, COD = 29–72 % (Dorji et al., 2022). Desain reaktor disajikan pada Gambar 8.



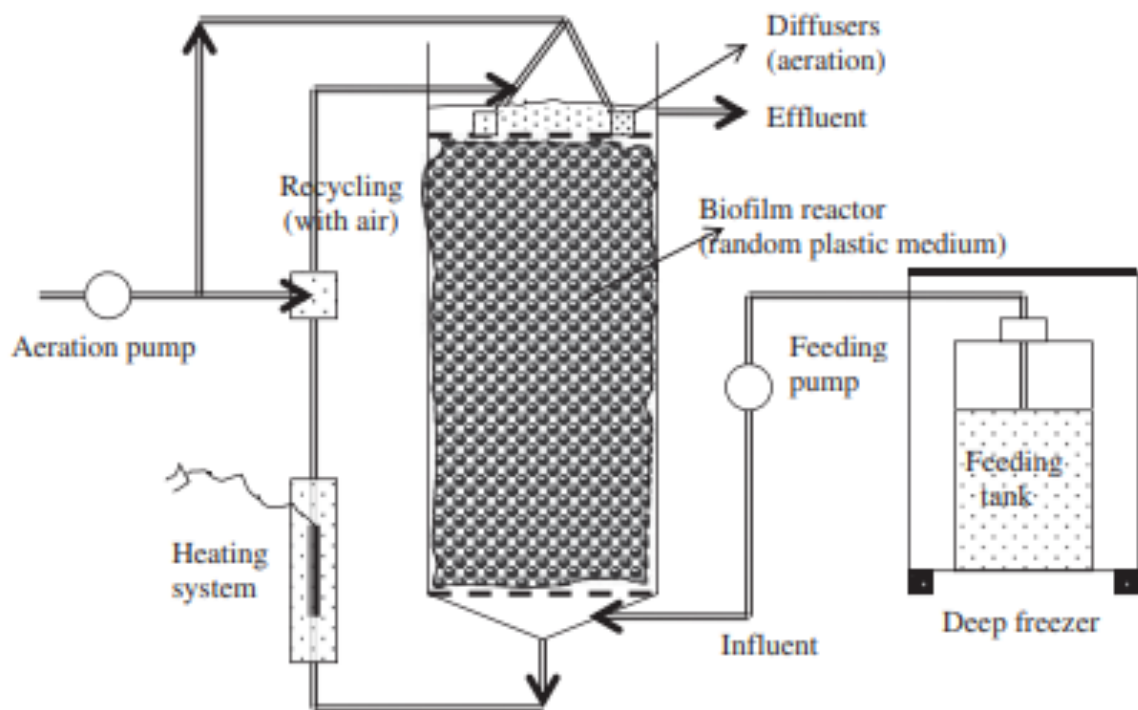
Gambar 8. Reaktor biofilter

Sumber: (Dorji et al., 2022)

2.6.5. Reaktor biofilter dengan sistem aerob menggunakan plastik acak

Umpan dalam tangki penyimpanan dipertahankan pada suhu 50°C hingga menghindari degradasi selama penyimpanan (suhu di reaktor dipertahankan pada 25-30°C). Reaktor memiliki diameter dalam 8,9 cm dengan volume efektif 2,5 L

serta luas permukaan partikel pendukung $A = 0,964 \text{ m}^2$, menghasilkan total luas permukaan penyangga per satuan volume cairan sebesar $385,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. HRT bervariasi antara sekitar 6,0 dan 19,0 jam dengan mengubah laju aliran umpan. Dua saringan plastik disediakan di bagian atas dan bawah reaktor. air limbah terus menerus dimasukkan ke bagian bawah reaktor menggunakan pompa (Grundfos DME19-6AR). Sebuah diffuser tipe akuarium dipasang di atas media reaktor untuk memasok air di dalam reaktor. Sampel dikeluarkan setiap hari dari sistem untuk dijelaskan. Dengan reaktor biofilter yang terancang ternyata media plastik random yang digunakan sebagai biofilter dapat menurunkan kandungan COD hingga 90-95% pada suhu optimal 25°C hanya dalam waktu 19 jam (Güneş, 2013). Desain reaktor disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Reaktor biofilter

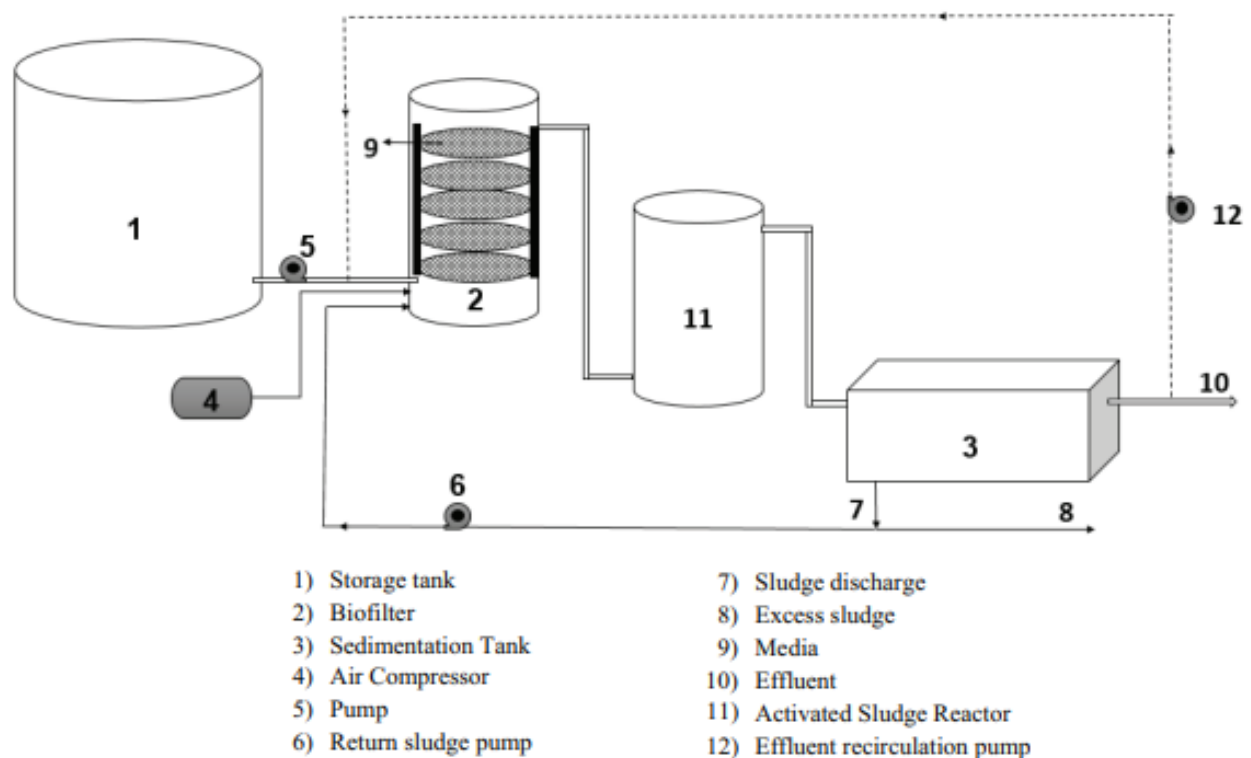
Sumber: (Güneş, 2013)

2.6.6. Reaktor biofilter aerobik dengan menggunakan media Piringan plastik

Volume efektif masing-masing silinder reaktor yang terbuat dari plexiglas berukuran sekitar 12 L. Piringan plastik bertali dipasang di dalam reaktor biofilter untuk menahan biofilm tetap ditempatnya. Sistem yang diteliti adalah aerobik dan

kedua reaktor dilengkapi dengan aerator diffuser. Aliran hidraulik dalam sistem bersifat batch. Untuk mendinginkan air limbah ke dalam sistem, dua pompa diafragma bilateral digunakan. Kapasitas penyiraman pompa diatur antara 0,1-2 ml/s. Kolam pengendapan atau kolam penjernih terdiri dari kolam dengan dimensi, $20 \times 30 \times 90$ cm (lebar $\times$ panjang $\times$ tinggi).

Biofilter menggunakan cakram plastik interlaced berbahan plexiglas dapat menurunkan COD hanya dalam waktu 4,4 jam pada suhu optimal 35°C (Shokoohi et al., 2017). Desain reaktor disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10 Reaktor biofilter

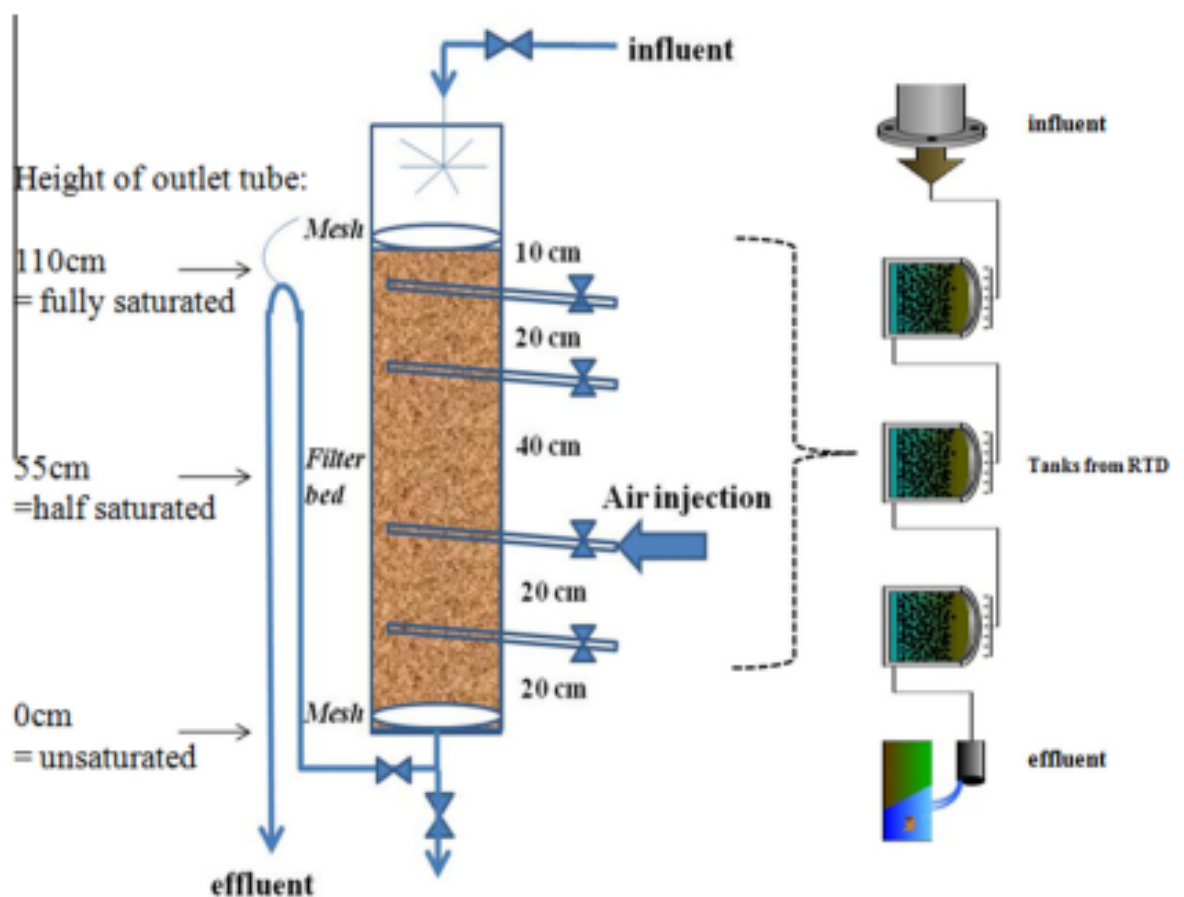
Sumber: (Shokoohi et al., 2017)

2.6.7. Reaktor biofilter aerobik dengan menggunakan media cincin plastik dan manik manik kaca

Biofilm dikembangkan dalam kolom silinder (luas 78 cm^2). Media berpori cincin plastik (AnoxKaldnes™ K1 dengan diameter 10 mm dan panjang 7 mm) dan manik-manik kaca (diameter dari 4 mm) digunakan untuk mendukung biofilm dalam dua kolom terpisah dengan filter bed setinggi 110 cm. Luas permukaan

spesifik cincin plastik dan manik-manik kaca berukuran $500 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ dan $900 \text{ m}^2 / \text{m}^3$. Air bertekanan diinjeksikan dengan kecepatan $0,4 \text{ L/menit}$ melalui katup yang terletak pada kedalaman filter 70 cm untuk menghasilkan kondisi aeroobik di bagian atas dan kondisi anoxic di bagian bawah. Air limbah sintetis dibuat dengan mencampurkan $0,40 \text{ g/L}$ sukrosa, $0,88 \text{ g/L}$ ekstrak daging (Knorr Viandox™), $0,23 \text{ g/L}$ NH_4Cl dan $0,02 \text{ g/L}$ H_3PO_4 dalam feeding tank 80 L , dan larutan substrat diperbarui setiap 2 atau 3 hari.

Penyisihan TOC juga merupakan temuan yang menarik, dimana studi skala laboratorium menggunakan air limbah sintetis dan media cincin plastik dapat menghilangkan 60% hingga 80% TOC dalam 7 hari (Zeng et al., 2013). Desain reaktor disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11 Reaktor biofilter

Sumber: (Zeng et al., 2013)

2.7. Laju kinetika degradasi

Salah satu hal yang diperlukan agar reaksi enzimatik dapat berjalan efisien adalah dengan menentukan jumlah substrat yang diperlukan. Unsur kunci dalam persamaan Michaelis-Menten adalah K_m , yang bersifat khas bagi enzim tertentu, dengan substrat spesifik pada kondisi pH dan suhu tertentu. Nilai K_m (Konstanta Michaelis-Menten) dapat digunakan untuk mencerminkan jumlah substrat. Dengan mengetahui nilai K_m dan V_{maks} suatu enzim, maka dapat dilakukan optimalisasi penggunaan enzim tersebut sebagai biokatalisator dalam pemecahan substrat menjadi produk. Nilai K_m dihitung dengan mengukur kecepatan reaksi yang dikatalisis oleh lipase dalam berbagai konsentrasi minyak dengan pH, suhu, dan waktu inkubasi optimum (Ratnayani et al., 2015).

Penentuan parameter kinetika dengan persamaan Michaelis-Menten dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi substrat dalam hal ini mikroorganisme lokal yang telah dibuat terhadap enzim yang mengurai mikroorganisme yang ada pada air limbah. Pada persamaan Michaelis-Menten: m_{maks} jika kecepatan reaksi awal tepat sama dengan setengah kecepatan maksimum maka diperoleh $K_m = [S].V_o = \frac{V_{maks}(S)}{S + K_m}$

Dalam berbagai penelitian terkait pertumbuhan mikroba, Persamaan Monod adalah salah satu model yang paling banyak digunakan. Model ini dinyatakan dalam bentuk paling sederhana yang menunjukkan hubungan fungsional antara laju pertumbuhan spesifik (μ_g) dan esensial konsentrasi substrat (S), yaitu, $\mu_g = \mu_{g,maks} \frac{S}{S + K_s}$, dimana $\mu_{g,maks}$ adalah tingkat pertumbuhan spesifik maksimum dan K_s adalah yang disebut konstanta monod. Seperti yang ditunjukkan oleh (C.P Leslie Grady et al., 1999), persamaan monod telah dianggap sebagai model teoritis, padahal sebenarnya itu murni empiris dan diusulkan berdasarkan pemasangan kurva dari data percobaan. Harus diakui bahwa Persamaan monod dapat memberikan kepuasan yang paling umum pemasangan kurva dari data pertumbuhan bakteri. Sejak persamaan monod diterbitkan setengah abad yang lalu, seseorang telah mencoba melihat ke dalam teori rasional dan mekanisme persamaan monod yang paling sederhana bentuk hiperbola. Persamaan monod menggambarkan hubungan antara tingkat pertumbuhan mikroorganisme dengan

pemanfaatan substrat, dimana laju pertumbuhan akan terus meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi substrat.

Persamaan berikut merupakan persamaan monod $\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s + S_s}$ dimana μ_m adalah laju pertumbuhan maksimum spesifik dan K_s adalah konstanta monod, dengan nilai 20,123 (Sarah et al., 2022). Berikut ini jenis jenis persamaan model yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 3. Jenis-Jenis Model Persamaan

No	Persamaan Umum	Bentuk Persamaan
1	Monod	$\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s + S_s}$
2	Michaelis Menten	$V_o = \frac{V_{maks}(S)}{S + K_M}$
3	Kontois	$\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s \cdot X_a + S_s}$
4	Sokol Howell, seorang insinyur	$\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s + S_s^2}$
5	Hutan Hinshel	$\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s + S_s^2} \left(\frac{P_m}{P_m + P} \right)$
6	Yerusalem	$\mu = \mu_{maks} \frac{S_s}{K_s + S_s^2} \left(\frac{K_p}{K_p + P} \right)$
7	Tessier	$\mu = \mu_m (1 - e^{-K_s})$
8	Moser	$\mu = \frac{\mu_m S^n}{K_s + S^2} = \mu_m (1 + K_s S^{-n})^{-1}$

Sumber: (Onysko, 1999; Abunde et al., 2017; Sarah et al., 2022)

SEKOLAH PASCASARJANA