

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Limbah Laundry

Menurut Permen LHK Nomor 80 Tahun 2019, air limbah merupakan cairan yang dibuang ke lingkungan dan berpotensi merusak kualitas lingkungan. Sementara itu, menurut Metcalf dan Eddy (2003), limbah adalah cairan sisa dari aktivitas rumah tangga, industri, atau tempat-tempat umum lain yang mengandung zat-zat yang berbahaya bagi manusia dan makhluk hidup lain serta merugikan kelestarian lingkungan.

Air limbah laundry merupakan air limbah yang dihasilkan dari usaha laundry yang menggunakan deterjen untuk proses pencuciannya. Deterjen adalah senyawa sintetik yang memiliki kandungan surfaktan (surface active agent) dan berfungsi sebagai pembersih yang efektif dalam kegiatan domestik dan industri, seperti, tekstil, kosmetik, farmasi, logam, kertas, dan karet. Komposisi surfaktan dalam deterjen sejumlah 20 – 30%, sementara sisanya adalah builder (senyawa fosfat) 70 – 80% dan bahan aditif (pemutih dan pewangi) sebesar 2 – 8% (Kirk dan Orthmer, 1982).

Surfaktan anionik merupakan komponen deterjen yang paling banyak digunakan, yang memiliki gugus fungsi sulfat (SO_4^{2-}) atau sulfonat (SO_3^-). Deterjen sulfonat memiliki dua macam struktur kimia, yaitu struktur bercabang yang disebut Alkyl Benzene Sulfonate (ABS) dan struktur linear yang disebut Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) (Sopiah dan Chaerunisah, 2006).

Tanpa dipungkiri, senyawa lain yang terdapat dalam deterjen juga, seperti golongan ammonium kuartener memiliki dampak buruk terhadap kesehatan. Senyawa ini dapat menghasilkan senyawa nitrosamine yang bersifat karsinogenik sehingga menyebabkan iritasi pada kulit, menghambat penyembuhan luka, dan menimbulkan katarak pada orang dewasa. Busa yang muncul juga dapat mempengaruhi permukaan perairan karena menghalangi pertukaran oksigen antara

udara dan air yang menyebabkan oksigen terlarut menurun dan kondisi menjadi septik, berbau, dan berwarna hitam serta menyebabkan kematian organisme aerobik di perairan (Purnama dan Purnama, 2015).

Fosfat juga merupakan komponen penting dalam deterjen, yang berfungsi sebagai penjernih air dan *builders*. Fosfat yang berlebihan dapat menimbulkan eutrofikasi, yaitu kondisi peningkatan konsentrasi unsur hara di perairan sungai atau danau. Eutrofikasi ditunjukkan oleh munculnya alga dan eceng gondok secara masif, yang dapat mengancam kehidupan biota air dan keseimbangan lingkungan (Oktaviana, 2021).

Penggunaan secara langsung air bekas cuci untuk air siram tanaman untuk konsumsi, seperti tanaman jenis buah dan sayuran, juga berbahaya bagi manusia karena kemungkinan terjadi pertumbuhan cyanobacteriae pada tumbuhan yang disirami (Sivonen, 2009). Kandungan air limbah laundry dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik Air Limbah Laundry

Parameter	Eriksson et al (2002)	Ge et al (2004)
pH	9.3 – 10	7.83 – 9.56
Kekeruhan (NTU)	50 – 210	471 – 583
Surfaktan (mg/l)	–	72.3 – 64.5
BOD (mg/l)	725	785 – 1090
COD (mg/l)	150 – 380	–
TSS (mg/l)	120 – 280	–
Fosfat (mg/l)	4 – 15	–
Total N (mg/l)	6 – 21	–

2.2 Parameter Kualitas Air

2.2.1 Baku Mutu Air Limbah

Persyaratan kualitas air bersih berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi

Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya yang diperbolehkan adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Persyaratan Kualitas Air Limbah Laundry Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 5 Tahun 2014 Limbah Industri yang Menggunakan Deterjen

Parameter	Satuan	Kadar maksimum yang diperbolehkan
pH	-	6 – 9
BOD ₅	mg/L	75
COD	mg/L	180
TSS	mg/L	60
Minyak dan lemak	mg/L	15
MBAS (Detergent)	mg/L	3
Fosfat	mg/L	2

Sementara, nilai kekeruhan yang diperbolehkan dalam Permenkes Nomor 32 Tahun 2017 merujuk kepada kebutuhan *hygiene* dan sanitasi senilai < 25 NTU.

2.2.2 Parameter Kualitas Air

1. Kekeruhan

Kekeruhan merujuk pada kondisi di mana cairan, seperti air, mengandung partikel tersuspensi yang menghambat penetrasi cahaya matahari. Partikel-partikel ini dapat berupa butiran kasar atau halus, materi anorganik, dan materi organik dengan ukuran yang bervariasi dari koloid hingga partikel kasar yang terdispersi. (Sawyer et al, 2003).

2. Warna

Air permukaan, terutama yang berasal dari daerah rawa, seringkali memiliki warna sehingga tidak dapat digunakan untuk keperluan domestik atau beberapa industri. Mayoritas bahan yang memberikan warna pada air adalah zat humat, yang merupakan hasil dari interaksi air dengan materi organik seperti daun dan kayu yang

sedang mengalami proses dekomposisi. Selain itu, besi juga merupakan senyawa atau elemen yang berpotensi memberikan warna pada air (Sawyer et al, 2003).

3. pH

pH merupakan parameter universal yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan suatu larutan. Secara teknis, pH merujuk pada konsentrasi ion hidrogen, atau lebih tepatnya, aktivitas ion hidrogen dalam larutan. Dalam konteks pengolahan air, pH menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam berbagai proses seperti koagulasi kimia, desinfeksi, pelunakan air, dan pengendalian korosi. Asam dan basa yang awalnya dibedakan berdasarkan perbedaan rasa dan efeknya terhadap bahan lain menjadi dasar dalam pengembangan indikator pH. Indikator pH ini digunakan untuk mengukur dan memantau tingkat pH dalam berbagai aplikasi, termasuk pengolahan air (Sawyer et al, 2003).

4. *Total Suspended Solid*

Padatan yang tidak dapat melewati lapisan filter disebut padatan tersuspensi. Padatan tersuspensi kemudian dinyatakan dalam *Total Suspended Solids* (TSS), *Volatile Suspended Solids*, atau *Fixed Suspended Solids*, dan dapat dibagi menjadi tiga komponen berdasarkan karakteristik pengendapan: *settleable solids*, *floatable solids*, dan *colloidal solids*. TSS adalah bahan-bahan tersuspensi (diameter > 1 μ m) yang tertahan pada saringan miliopore dengan diameter pori 0,45 μ m (Karams dan Pujiyati, 2014).

Konsentrasi TSS yang normal pada air limbah berkisar antara 100 hingga 350 mg/L (Spellman, 2008). Konsentrasi TSS apabila terlalu tinggi akan menghambat penetrasi cahaya ke dalam air dan mengakibatkan terganggunya proses fotosintesis. Salah satu upaya menangani persoalan ini dengan menggunakan filtrasi. Ketika air melalui filtrasi, media filtrasi akan menahan padatan tersuspensi sehingga air yang keluar akan mengandung TSS yang lebih sedikit (Amjad, 2010).

5. *Total Dissolved Solid*

Total Dissolved Solid atau zat padat terlarut adalah terlarutnya zat padat berupa ion, senyawa, koloid di dalam air. Padatan terlarut didapat dari sumber organik seperti dedaunan, lumpur, dan limbah (Palanna, 2009). Sumber lainnya adalah runoff dari pemukiman, jalan, dan pestisida atau yang biasa digunakan dalam pertanian. Selain dari bahan organik, sumber lain dari TDS adalah dari bahan anorganik seperti bebatuan dan udara yang mengandung kalsium bikarbonat, nitrogen iron, sulfur dan mineral lain. Ukuran TDS biasanya tidak lebih dari 10^{-6} mm (Palanna, 2009).

6. Fosfat (P)

Fosfat hadir dalam air alam dan air limbah dalam bentuk senyawa ortofosfat, polifosfat, dan fosfat organik. Senyawa fosfat ini dapat berada dalam bentuk terlarut, tersuspensi, atau terikat dalam sel organisme di dalam air. Pada air limbah dari laundry, fosfat berasal dari deterjen. Keberadaan fosfat yang berlebihan di dalam badan air dapat menyebabkan fenomena yang disebut eutrofikasi, yaitu pengkayaan nutrien. Sebelum dibuang, air limbah harus diolah untuk mengurangi kandungan fosfat hingga mencapai nilai tertentu sesuai dengan baku mutu efluen (10 mg/l). Dalam pengolahan air limbah, fosfat dapat disisihkan melalui proses fisika-kimia maupun biologis (Masduqi, 2004)

7. Nitrit dan Nitrat

Dinitrogen, yang mencakup 76% dari massa atmosfer, diubah menjadi protein melalui proses biologis, menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan oleh organisme. Proses ini dikenal sebagai nitrifikasi, suatu proses oksidasi yang menghasilkan ion nitrit dan nitrat dengan bilangan oksidasi +3 dan +5 (Nollet dan Gelder, 2013).

Nitrit dan nitrat adalah senyawa yang mudah tersebar di lingkungan. Dalam ekosistem air yang tidak stabil secara kimia dan termodinamika, seperti badan air tempat pembuangan limbah atau lapisan air anaerobik dan aerobik, berbagai bentuk senyawa nitrogen dalam keadaan oksidasi yang berbeda dapat hidup berdampingan.

Namun, konsentrasi nitrit dan nitrat yang tinggi berpotensi menimbulkan masalah pada lingkungan (Nollet dan Gelder, 2013).

Di perairan alami, nitrit biasanya ditemukan dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan nitrat karena sifatnya yang tidak stabil dalam keberadaan oksigen. Nitrit berfungsi sebagai perantara dalam siklus nitrogen, berperan dalam konversi ammonia menjadi nitrat, dan juga dalam reduksi nitrat menjadi gas nitrogen (Novotny dan Olem, 1994).

2.3 Proses Pengolahan Air Limbah

Proses pengolahan air limbah bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminan. Kontaminan ini dapat berupa sifat fisik, kimia, atau biologis. Pengolahan dilakukan dengan metode fisik, kimia, dan biologis untuk memastikan bahwa air buangan yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan.

1. Pengolahan Secara Fisika

Pengolahan fisik adalah metode untuk memisahkan sebagian beban pencemaran dalam limbah cair, terutama padatan tersuspensi atau koloid dengan memanfaatkan gaya-gaya fisika. Beberapa contoh pengolahan fisik dalam unit pengolahan air limbah domestik meliputi screening, filtrasi, dan sedimentasi (pengendapan). Proses sedimentasi digunakan untuk mengendapkan partikel atau bahan tersuspensi yang mudah mengendap. Dalam sedimentasi, flok padatan dipisahkan dari aliran menggunakan gaya gravitasi. Parameter desain utama untuk proses pengendapan meliputi kecepatan mengendap partikel dan waktu detensi hidrolis di dalam bak pengendap (Metcalf dan Eddy, 2003).

2. Pengolahan Secara Kimia

Pengolahan secara kimia adalah metode di mana kontaminan mengalami penyisihan atau perubahan karakteristik melalui penambahan bahan kimia dan reaksi kimia seperti presipitasi dan desinfeksi. Metode ini umumnya digunakan untuk mengatasi partikel yang tidak mudah mengendap, logam berat, dan zat organik beracun dengan menambahkan bahan kimia yang sesuai (Eviati dan Sulaeman, 2009). Meskipun pengolahan kimia dapat

memberikan efisiensi pengurangan yang lebih baik, konsentrasi total padatan cenderung meningkat karena penambahan bahan kimia. Selain itu, penggunaan bahan kimia juga mempengaruhi biaya operasional karena memerlukan energi yang lebih besar (Metcalf dan Eddy, 2003).

3. Pengolahan Secara Biologi

Proses pengolahan biologis merupakan pengolahan air limbah dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme yang berkontak dengan air limbah. mikroorganisme tersebut dapat menggunakan zat pencemar yang ada pada air limbah sebagai bahan makanan dan mendegradasi atau menstabilisasinya menjadi bentuk yang lebih sederhana (Metcalf dan Eddy, 2003).

2.4 Pengolahan Biologis

Salah satu tujuan dari pengolahan secara biologis adalah (Metcalf dan Eddy, 2003):

1. Mentransformasi konstituen terlarut dan partikel biodegradable menjadi produk akhir yang sesuai dengan kriteria yang digunakan;
2. Menyatukan padatan koloid tersuspensi dan yang bersifat nonsettleable menjadi flok atau biofilm;
3. Mentransformasi atau menyisihkan kandungan nutrient;
4. Menyisihkan konstituen organik spesifik dengan kandungan yang kecil dalam air limbah.

Proses pengolahan air limbah secara biologis dapat dilakukan dalam kondisi aerobik, anaerobik, atau pun kombinasi aerobik dan anaerobik.

2.4.1 Reaktor Pertumbuhan Tersuspensi (*Suspended growth reactor*)

Dalam (Metcalf dan Eddy, 2003), mikroorganisme digunakan untuk menguraikan senyawa polutan dalam air sistem pengolahan dengan biakan tersuspensi. Proses ini melibatkan biakan mikroorganisme yang dibiakkan secara tersuspensi di dalam reaktor. Beberapa contoh proses pengolahan dengan sistem ini termasuk activated sludge, step aeration, contact stabilization, extended aeration, dan oxidation ditch.

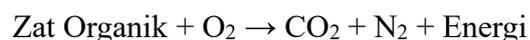
Activated sludge adalah salah satu proses suspended growth yang umum dan banyak digunakan. Pada proses ini, mikroorganisme diaktifkan dan mampu menstabilkan air limbah dalam kondisi aerobik. Tangki aerasi digunakan untuk mencampur dan mendegradasi air limbah dengan suspensi mikroorganisme, yang biasa disebut mixed liquor suspended solid (MLSS).

2.4.2 Reaktor Pertumbuhan Melekat (*Attached growth reactor*)

Pada proses attached growth, mikroorganisme yang berperan mengkonversi materi organik atau hidup dan berkembang menyatu pada material inert tertentu. Materi organik tersebut disisihkan saat air limbah mengalir melewati material inert tersebut. Materi yang digunakan sebagai tempat hidup dan pertumbuhan mikroorganisme antara lain dapat berupa batu, gravel, pasir, kayu, plastik dan materi sintetis. Proses attached growth dapat berlangsung secara aerob maupun anaerob dan material inert yang digunakan sebagai tempat hidup mikroorganisme dapat terendam sepenuhnya dalam air limbah ataupun tidak terendam (Metcalf dan Eddy, 2003). Pengolahan air limbah dengan biakan melekat pada media, sehingga mikroorganisme melekat pada permukannya.

2.4.3 Proses Pengolahan Biologis Secara Aerobik

Proses pengolahan biologi aerobik berarti proses yang memerlukan oksigen terlarut. Oksidasi bahan organik menggunakan molekul oksigen sebagai akseptor akhir adalah proses utama yang menghasilkan energi kimia untuk mikroorganisme dalam proses ini. Bakteri yang bekerja dalam kondisi aerob disebut juga bakteri aerobik. Mikroorganisme ini memerlukan oksigen bebas terlarut untuk menyederhanakan senyawa organik guna mendapatkan energi untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Tjokrokusumo, 2001):



2.4.4 Proses Pengolahan Biologis Secara Anaerobik

Proses anaerobik melibatkan mikroorganisme yang mendegradasi bahan organik tanpa oksigen terlarut. Tahapan penguraian anaerobik mencakup hidrolisis,

pembentukan asam, pembentukan asetat, dan pembentukan gas metana. Hidrolisis adalah proses di mana bakteri hidrolitik memecah bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Selanjutnya, pada tahap asidogenesis, bakteri mengubah senyawa-senyawa tersebut menjadi asam-asam organik. Proses selanjutnya adalah asetogenesis, di mana asam-asam organik diubah menjadi asetat oleh bakteri asetogen. Akhirnya, pada tahap metanogenesis, bakteri metanogen menghasilkan gas metana (CH_4) dari asetat dan hidrogen (Fusvita, 2015).

2.5 Filtrasi

Pemahaman manusia tentang pemisahan padatan dari cairan telah ada sejak zaman prasejarah. Misalnya, seseorang mungkin menyadari bahwa air yang diambil dari kolam berlumpur akan lebih layak konsumsi jika dibiarkan mengendap terlebih dahulu. Dengan berjalannya waktu, manusia mulai memahami bahwa proses ini dapat dipercepat dengan menyaring air berlumpur melalui media sederhana seperti kain atau karung pasir. Dari sini, disiplin teknik penyaringan muncul sebagai respons terhadap kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produk seperti air minum (Sparks, 2012).

Pada tahun 1892, operasi filtrasi pertama dilakukan di Inggris, yang dirancang hanya untuk membiarkan air melewati media pasir tanpa bantuan proses kimia atau mekanis (Droste dan Gehr, 2018). Seiring dengan perkembangan teknologi dan revolusi industri, teknologi filtrasi mulai dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan industri dan penyediaan air minum. Dengan meningkatnya populasi dunia, kebutuhan akan air bersih dan air minum juga meningkat, sehingga memicu pengembangan teknologi dalam pemurnian air, salah satunya adalah filtrasi atau penyaringan.

Menurut Tom dan Richards (1996), filtrasi didefinisikan sebagai proses pemisahan padatan dan cairan, di mana cairan melewati media berpori atau material berpori lainnya untuk menghilangkan sebanyak mungkin padatan tersuspensi halus. Filtrasi digunakan dalam pengolahan air untuk menyaring air yang telah dikoagulasi dan mengendap secara kimia, dengan tujuan menghasilkan air minum berkualitas tinggi. Dalam konteks pengolahan air limbah, filtrasi digunakan untuk

menyaring limbah sekunder yang belum diolah, limbah sekunder yang telah diolah secara kimia, dan limbah cair mentah yang telah diolah secara kimia. Tujuan dari ketiga aplikasi ini adalah untuk menghasilkan efluen berkualitas tinggi (Tom dan Richards, 1996).

Dalam konteks penyaringan air, Spellman (2008) menjelaskan bahwa ini adalah proses fisik yang melibatkan pemisahan partikel tersuspensi dan koloid dari limbah. Proses ini dilakukan dengan mengalirkan air melalui media serta melibatkan tahapan penyaringan, pengendapan, dan adsorpsi. Efisiensi penghilangan flok meningkat ketika ruang antara media filter tersumbat, dan beberapa materi bahkan dapat dihilangkan sepenuhnya melalui pengendapan pada media.

Di sisi lain, Amjad (2010) mendefinisikan filtrasi sebagai proses mekanis untuk menghilangkan padatan tersuspensi dari fluida dengan cara mengalirkan fluida tersebut melalui media berpori dengan tekanan. Efektivitas penghilangan partikel sangat bergantung pada jenis media filtrasi yang digunakan. Setelah proses pengendapan menghilangkan partikel yang lebih besar dari air, proses filtrasi digunakan untuk menghilangkan lebih banyak padatan tersuspensi yang masih tersisa dalam air. Efisiensi dalam penghilangan padatan tersuspensi ini sangat bergantung pada ukuran, jenis, dan desain filter.

2.5.1 Macam-macam filter

1. Berdasarkan Tipe Media

Menurut Qasim et al. (2000), media filter bed dapat dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu filter dengan media tunggal, filter dengan media ganda, dan filter campuran. Filter dengan media tunggal hanya menggunakan satu jenis media, seperti pasir atau antrasit. Sementara itu, filter dengan media ganda menggunakan dua jenis media, biasanya kombinasi pasir dan antrasit. Filter campuran, atau yang juga dikenal sebagai multimedia, menggunakan lebih dari dua jenis media. Media yang umumnya digunakan dalam filter campuran adalah antrasit, pasir, dan garnet. Keuntungan utama dari filter campuran adalah kemampuannya untuk menyediakan volume ruang pori yang lebih besar untuk penyimpanan padatan. Pada filter dengan

media tunggal, volume pori hanya berada di atas lapisan bed, sedangkan pada filter campuran, volume pori dapat mencapai kedalaman bawah bed (Qasim et al, 2000).

Tabel 2.3 Kriteria Desain Berdasarkan Tipe Media Filter

Karakteristik	Satuan	Singled Media Filter		Doubled Media Filter		Mixed Media Filter	
		Nilai		Nilai		Nilai	
		Range	Tipikal	Range	Tipikal	Range	Tipikal
Media Pasir							
Kedalaman	mm	610 – 760	685	150 – 205	150	150 – 230	230
Ukuran Efektif	mm	0.35 – 0.7	0.6	0.45 – 0.55	0.5	0.45 – 0.55	0.5
Koefisien Keseragaman	-	<1.7	<1.7	1.5 – 1.7	1.6	1.5 – 1.65	1.6
Media Antrasit							
Kedalaman	mm	610 – 750	685	460 – 610	610	420 – 530	460
Ukuran Efektif	mm	0.7 – 0.75	0.75	0.9 – 1.1	1	0.9 – 1	1
Koefisien Keseragaman	-	<1.75	<1.75	1.6 – 1.8	1.7	1.55 – 1.75	<1.75
Media Garnet							
Kedalaman	mm					36 – 155	75
Ukuran Efektif	Mm					0.2 – 0.35	0.2
Koefisien Keseragaman	-					1.6 – 2	<1.6

Sumber: (Qasim et al, 2000)

2. Berdasarkan Laju Filtrasi

Filtrasi berdasarkan kecepatannya dibagi menjadi dua, yakni Slow Sand Filter dan Rapid Sand Filter. Dari tabel berikut akan dijelaskan perbedaan karakteristik dari dua model filtrasi yang telah disebutkan (Droste dan Gehr, 2018).

Tabel 2.4 Karakteristik Slow Sand Filtration dan Rapid Sand Filtration

Karakteristik		<i>Slow Sand Filter</i>	<i>Rapid Sand Filter</i>
Laju filtrasi		1 – 8 m ³ /m ² /hari	100 – 400 m ³ /m ² /hari
Kedalaman Bed / Lapisan		0.3 m gravel	0.5 m gravel
		1 – 1.5 m pasir	0.6 – 0.8 m pasir
Ukuran Pasir	Effective Size	0.15 – 0.35 mm	>0.45 mm
	Uniformity Coefficient	2 – 3	<1.5
Ripening Time (Pematangan)		Beberapa Hari	1 – 4 hari
Lama Pengoperasian		20 – 150 Hari	12 – 72 hari
Penetrasi Material Tersuspensi		Dangkal (Lapisan atas yang dibersihkan)	Dalam (keseluruhan filter harus dicuci)
Persiapan Pengolahan Air		Umumnya aerasi, tidak ada proses kimia, tetapi flokulasi dan sedimentasi tidak wajib dimasukkan	Koagulasi penting, flokulasi dan sedimentasi tidak wajib dimasukkan
Nilai Kekeruhan Maksimum		10 NTU	Harus melalui prapengolahan yang baik
Metode Pembersihan		- Melakukan pengikisan pada lapisan permukaan pasir secara manual ataupun mekanis dan mencuci pasir - Mencuci permukaan pasir dengan mesin pencuci berjalan	Proses pengikisan berlangsung secara mekanis, udara atau air dan pembuangan material dengan aliran backwash ke atas
Biaya	Konstruksi	Lebih Tinggi	Lebih Rendah
	Operasi	Lebih Rendah	Lebih Tinggi
	Depresiasi	Lebih Rendah	Lebih Tinggi
Jumlah Air yang Dicuci		0.2 – 0.6 % dari air yang telah disaring	1 – 6 % dari air yang telah disaring

Sumber: (Droste dan Gehr, 2018)

a. Saringan Pasir Cepat (*Rapid Sand Filter*)

Jenis filtrasi ini biasa digunakan untuk mengolah air minum dan industri. Namun, seringkali terjadi penyumbatan (clogging) pada filter, sehingga diperlukan proses pencucian balik (backwash). Filter pasir harus dicuci setelah proses filtrasi berhenti, terutama setelah terjadi akumulasi partikel suspensi dalam pori filter. Kecepatan cuci balik filter pasir dibatasi agar partikel pasir tetap terfluidisasi dan berada dalam posisi melayang di dalam aliran air pencuci, sehingga tidak menyebabkan partikel filter terangkut keluar dari ruang filter.

b. Saringan Pasir Lambat (*Slow Sand Filter*)

Saringan pasir lambat adalah metode pengolahan air yang menggunakan pasir sebagai media penyaringan. Meskipun butiran pasir sangat kecil, kandungan kuarsanya tinggi. Teknologi ini telah efektif digunakan selama lebih dari 150 tahun. Ketika air baku mengalir melalui saringan pasir lambat, partikel kotoran tertahan oleh media pasir. Akumulasi kotoran, baik yang berasal dari zat organik maupun anorganik, membentuk lapisan biologis pada media filter. Selain proses penyaringan fisik, lapisan ini juga menghilangkan kotoran secara bio-kimia. Contohnya, amonia dengan konsentrasi rendah, zat besi, mangan, dan bahan penyebab bau dapat dihilangkan melalui metode ini

3. Berdasarkan Media yang Dipakai

Menurut Amjad (2010), pemakaian media untuk filtrasi dikelompokkan menjadi 6 yang akan diuraikan secara singkat melalui tabel sebagai berikut.

Tabel 2.5 Pengelompokkan Media Filtrasi

Tipe Media Filtrasi	Keterangan
Agregat	Umumnya adalah alumunium silikat monohidro
Multilayered	Terdiri atas beberapa layer dengan susunan yang dimulai dari paling kasar menuju paling halus
Pasir	Proses filtrasi terjadi pada permukaan media
Karbon	Digunakan untuk menghilangkan parameter senyawa organic

Cartridge	Diaplikasikan pada partikel yang memiliki ukuran spesifik
Cyclonic	Memanfaatkan gaya sentrifugal dalam meniyisihkan polutan

Sumber: Amjad, 2010

a. Agregat

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi agregat memanfaatkan media yang terbuat dari magnesium silikat. Media ini memiliki karakteristik yang ringan dan berpori, mirip dengan batu apung, dan ditempatkan dalam tangki yang serupa dengan pelunak air. Keunggulan dari teknik ini adalah kemampuannya untuk menghilangkan padatan di bawah 1 um, membutuhkan ruang yang relatif kecil, dan mampu menghilangkan padatan melalui seluruh volume media filtrasi. Namun, media ini memiliki kelemahan yaitu sangat ringan sehingga dapat dengan mudah terbawa oleh backwash keluar dari tangki. Filter agregat tidak hanya digunakan untuk pengolahan air baku, tetapi juga digunakan sebelum proses pelunakan air.

b. Multilayered

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi berlapis melibatkan penggunaan serangkaian media dengan ukuran yang semakin besar ke arah bawah, sehingga media paling halus berada di bagian atas. Karakteristik ini memungkinkan laju aliran air yang lebih tinggi dibandingkan dengan filtrasi media tunggal. Selain itu, filtrasi berlapis dapat didesain untuk menghilangkan padatan dengan ukuran yang spesifik. Meskipun memiliki fungsi yang sama dengan filter agregat, filtrasi berlapis memiliki biaya pemasangan yang lebih tinggi.

c. Pasir

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi pasir adalah teknik yang sering digunakan dalam pengolahan air. Teknik ini melibatkan penggunaan media pasir untuk menghilangkan padatan berdasarkan ukuran pasir pada filter. Beberapa keuntungan dari teknik ini adalah biaya media pasir yang relatif murah, yang memungkinkan penggantian media pasir jika diperlukan. Namun, filtrasi pasir

memiliki beberapa kelemahan, seperti meninggalkan jejak yang besar pada unit, mudah dikotori oleh minyak dan lemak, dan tidak dapat menahan atau menghilangkan padatan yang berukuran kurang dari 1 um. Filtrasi pasir biasanya digunakan sebagai tahap awal dalam proses pengolahan air untuk menghilangkan lumpur dan puing-puing, sebelum dilanjutkan dengan filtrasi yang lebih halus seperti filtrasi karbon. Teknik ini juga sering digunakan sebagai tahap pra-pengolahan dalam sistem *reverse osmosis* (RO).

d. Karbon

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi karbon digunakan untuk menghilangkan berbagai kontaminan, seperti klorin, sedimen, bahan organik, fenol, pestisida, surfaktan, dan warna. Lapisan filter karbon perlu dicuci kembali untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan memerlukan proses penguapan untuk menghilangkan bahan organik yang ditangkap oleh media karbon. Proses penguapan ini dapat mengangkat bahan organik dan memperpanjang siklus penggunaan media karbon.

Filter karbon biasanya ditempatkan pada tangki stainless steel, besi, atau fiberglass, dengan stainless steel direkomendasikan untuk proses penguapan media. Fiberglass tidak dapat digunakan saat operasi penguapan dan tangki besi dapat berkarat pada saat kondisi penguapan, yang dapat mengurangi masa pemakaian alat. Salah satu masalah yang mungkin muncul dalam filtrasi karbon adalah pertumbuhan bakteri pada media. Untuk menghilangkan bakteri pada media, dapat ditambahkan hidrogen peroksida, namun hal ini akan menambah biaya perawatan.

e. Cartridge

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi cartridge melibatkan penggunaan media pabrikan yang dirancang untuk menyaring padatan berdasarkan ukuran spesifik *cartridge*. Keunggulan utama dari teknik ini adalah kemampuannya untuk menyaring partikel dengan ukuran spesifik secara sangat efektif. Namun, ada beberapa kelemahan dalam penggunaan teknik ini, seperti kebutuhan untuk

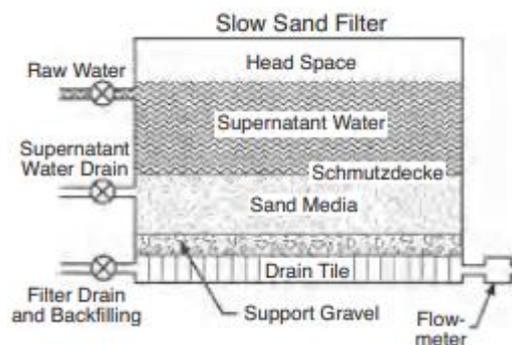
penggantian filter yang sering dan kewajiban bahwa filter harus terbuat dari material yang cocok dengan jenis pengotor yang ada di air.

f. Siklon

Amjad (2010) menjelaskan bahwa filtrasi siklon memanfaatkan prinsip sentrifugal untuk memisahkan padatan dari air. Teknik ini mampu menghilangkan padatan yang lebih besar dari 75 μ dan padatan di bawah 50 μ secara efektif saat beroperasi dalam parameter desain yang telah ditentukan. Filtrasi siklon, dengan demikian, menawarkan solusi efektif untuk pemisahan padatan dalam berbagai aplikasi pengolahan air.

2.6 Saringan Pasir Lambat

Saringan pasir lambat mengandalkan aktivitas biologis untuk menghilangkan sebagian besar partikel, namun penahanan dan keterikatan partikel juga berperan penting (Logsdon, 2011). Setelah saringan pasir lambat dioperasikan, terjadi fase pematangan selama beberapa minggu. Pada fase ini, lapisan atas filter ditumbuhi oleh zoogel atau gelatin padat. Lapisan ini bertanggung jawab atas penghilangan utama partikel tersuspensi dan koloid. Seiring waktu, headloss meningkat sampai batas maksimal dan bagian atas media filter tererosi. Aktivitas biologis menyebar ke bawah lapisan yang tererosi. Siklus ini berulang hingga media filter mencapai kedalaman minimum. Pada saat itu, media yang terbuang harus dicuci dan dikembalikan ke filter (Droste dan Gehr, 2018).



Gambar 2.1 Desain Slow Sand Filter

Sumber: (Logsdon, 2011)

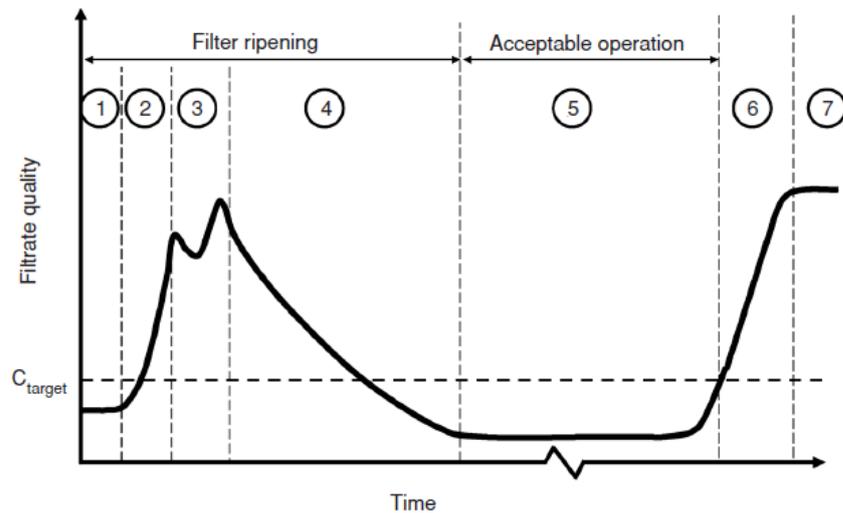
Saringan pasir lambat menggunakan dua mekanisme yaitu mekanis dan adsorpsi untuk menyaring bakteri. Mekanisme mekanis melibatkan penyaringan bakteri oleh butiran pasir, sedangkan mekanisme adsorpsi melibatkan penempelan bakteri pada lapisan Schmutzdecke. Lapisan ini merupakan aspek krusial dari saringan pasir lambat. Penyaringan mekanis oleh pasir tidak seefisien penyaringan oleh Schmutzdecke, yang terdiri dari bakteri, alga, dan organisme uniseluler dan multiseluler lainnya (Clark et al, 2012).

Kedalaman filter juga merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan. Ada dua variabel lain yang memengaruhi efektivitas saringan pasir lambat yaitu ukuran dan keseragaman partikel pasir. Keseragaman partikel pasir dipengaruhi oleh koefisien keseragaman pasir. Koefisien keseragaman pasir adalah perbandingan antara ukuran partikel pasir yang 60% beratnya lolos saringan dengan ukuran partikel pasir yang 10% beratnya lolos saringan. Koefisien keseragaman menunjukkan kesamaan ukuran partikel. Untuk meningkatkan efektivitas filter, diperlukan pasir dengan ukuran yang seragam (Clark et al, 2012).

Ukuran partikel pasir penting untuk diperhatikan karena memengaruhi kecepatan, pemeliharaan, dan efektivitas penyaringan. Partikel pasir yang lebih besar lebih disukai karena memungkinkan air disaring lebih cepat melalui pasir kasar. Partikel pasir yang lebih kecil dapat meningkatkan efektivitas penyaringan, tetapi mengurangi kecepatan penyaringan dan meningkatkan risiko penyumbatan (Logsdon, 2011).

2.7 Siklus Filtrasi

Selama proses filtrasi, partikel-partikel menumpuk di dalam ruang kosong dari lapisan filter, mengurangi ukuran pori efektif dan meningkatkan hambatan aliran yang mengakibatkan kenaikan pada *headloss*. Seiring berlangsungnya proses filtrasi, lapisan atas lapisan filter menjadi penuh dengan endapan sehingga butiran tidak dapat menahan partikel tambahan. Oleh karena itu, operasi lapisan filter menangkap/menempelkan partikel hingga habis sampai bagian bawah lapisan filter atau tidak ada penangkapan sama sekali. Ketika *headloss* terlalu besar, filter memerlukan pembersihan dengan mengalirkan backwash, bersamaan dengan udara, untuk melepaskan partikel yang tertahan dan membersihkan media filter.



Gambar 2.2 Siklus Filtrasi
 Sumber: Parsons dan Jefferson, 2006

1. *Lag phase*, air bersih keluar dari filter dari saluran bawah.
2. *Pre-ripening phase*, kualitas efluen menjadi lebih buruk, disebabkan oleh sisa air cucian kotor di pada lapisan media filter.
3. *Second pre-ripening phase*, kualitas efluen semakin memburuk karena sisa air cucian kotor di atas media.
4. *Ripening phase*, kualitas filtrat mulai membaik ke nilai tetapnya.
5. *Effective filtration*, filter beroperasi pada tingkat optimal dan mewakili periode utama operasi dalam siklus.
6. *Breakthrough phase*, kualitas filter mulai menurun saat filter mencapai kapasitasnya.
7. *Spent phase*, konsentrasi efluen filter telah mencapai maksimum.

2.8 Mekanisme Saringan Pasir Lambat

Dalam Metcalf dan Eddy (2003), *slow sand filtration* dikategorikan sebagai jenis dari *depth filtration* yang bertujuan untuk menghilangkan material *suspended* pada yang ada pada air dengan melewatkannya melalui lapisan filter yang terdiri dari media filter. Namun perlu diingat, lapisan biofilm juga memegang peranan

penting dalam proses penyisihan kontaminan organik serta bakteri yang ada pada air (Visscher et al, 1987).

Selain itu, menurut Metcalf dan Eddy (2003), mekanisme dari saringan pasir lambat terbagi menjadi 3 diantaranya, secara mekanis, adsorpsi dan pertumbuhan lapisan biologi yang akan dijelaskan sebagai berikut:

2.8.1 Mekanis

1. *Straining* atau Penyaringan

Penyaringan adalah mekanisme utama yang berperan dalam menghilangkan padatan tersuspensi saat penyaringan limbah yang telah mengendap dari proses pengolahan biologis. Proses penyaringan partikel dalam lapisan filtrasi dibagi menjadi 2:

- a. Mekanis : partikel suspended yang lebih besar dari ruang pori media akan disaring secara mekanis .
- b. Kontak : partikel suspended yang lebih kecil dari ruang pori akan terperangkap dalam penyaring oleh kontak kebetulan

2. Sedimentasi

Partikel-partikel yang sudah terperangkap dalam ruang pori lama-kelamaan tinggal dan mengendap diantara ruang pori

3. Impaksi

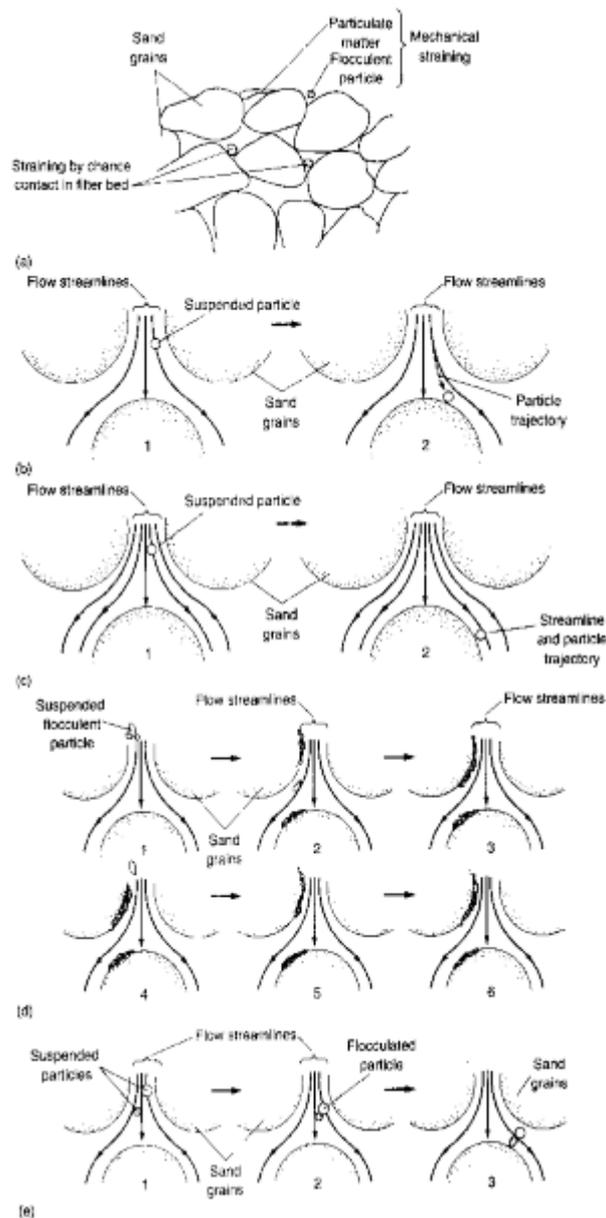
Partikel yang tertahan karena memiliki densitas atau massa yang besar sehingga tidak mengikuti aliran air.

4. Intersepsi

Banyak partikel yang bergerak di sepanjang garis arus dihilangkan ketika mereka bersentuhan dengan permukaan media yang cocok

5. Adhesi

Partikel tersuspensi menempel pada permukaan media penyaringan saat mereka lewat. Karena kekuatan air yang mengalir, beberapa material terkikis sebelum melekat kuat dan terdorong lebih dalam ke dalam lapisan filter.



Gambar 2.3 Proses Mekanisme Saringan Pasir Lambat
 Sumber: Metcalf dan Eddy, 2003

6. Flokulasi

Flokulasi adalah proses penggabungan partikel kecil menjadi partikel besar. Proses ini bisa terjadi di dalam lubang-lubang media filter. Partikel yang lebih besar yang terbentuk karena perbedaan kecepatan aliran di dalam filter kemudian disaring.

Menurut Camp (1964), flokulasi dapat menyebabkan partikel bergabung di dalam pori-pori filter. Hal ini menyebabkan perpindahan partikel meningkat sesuai dengan mekanisme transportasi lainnya. Namun, ini bukanlah metode perpindahan yang signifikan karena perubahan karakteristik partikel lebih dipengaruhi oleh mekanisme lain.

2.8.2 Perlekatan

Menurut Metcalf dan Eddy (2003), berikut adalah mekanisme yang dianggap mempengaruhi perlekatan:

1. Gaya Elektrostatik

Gaya elektrostatis antara butiran media dan partikel yang larut dalam air sangat penting untuk mekanisme penempelan. Gaya ini biasanya menimbulkan tolakan antara partikel dan pasir, dan cenderung negatif di dalam air. Namun, dalam keadaan tertentu, gaya elektrostatis dapat membantu penempelan kalau muatan butiran dan partikel berbeda muatannya akan menciptakan proses penempelan (Davies, 2012).

2. Gaya Van Der Waals

Gaya Van der Waals adalah gaya tarik-menarik molekuler yang berlaku secara universal antara atom dan molekul. Namun, gaya ini hanya efektif pada jarak yang sangat dekat, yaitu sekitar 50 nanometer (nm) antara atom-atom. (Davies, 2012)

3. Gaya Elektrokinetik

Elektrokinetik didefinisikan sebagai perpindahan fisikokimia muatan, aksi partikel bermuatan, dan efek potensial yang diterapkan pada pembentukan dan perpindahan fluida di media berpori (Rao et al, 2017).

Perlu diketahui, ketika sebuah partikel telah bersentuhan dengan permukaan media pengisi atau dengan partikel lain, perlekatan mungkin bertanggung jawab untuk menahannya di sana (Metcalf dan Eddy, 2003).

2.8.3 Pertumbuhan Lapisan Biologi

Senyawa organik yang terlarut di dalam air akan menjadi bahan makanan oleh mikroorganisme yang berada pada bagian atas lapisan filter (Tabraiz, et al, 2022). Pertumbuhan *biofilm* pada permukaan butiran pasir memberikan permukaan

sebagai tempat melekatnya kontaminan di dalam air. Jumlah bakteri mungkin rendah pada awal pengoperasian filter pada sebelum pematangan biofilm (Balen, 2018).

2.9 Schmutzdecke

Schmutzdecke adalah lapisan komunitas mikroba yang mengolah air saat melewati lapisan pasir. Lapisan biologis ini menangkap atau memfilter partikel asing. Perkembangan lapisan Schmutzdecke bergantung pada beberapa faktor, antara lain ketersediaan mikroba dalam air baku, suplai nutrisi, suplai oksigen, waktu kontak, dan kelembaban lapisan pasir. Dalam lapisan schmutzdecke, terjadi aktivitas biologis yang dapat mendegradasi senyawa organik dan mengurangi kontaminasi, bau, rasa, dan warna dalam air. Pembentukan lapisan ini membutuhkan waktu dalam beberapa minggu atau bahkan hingga bulanan (Ranjan dan Prem, 2018).

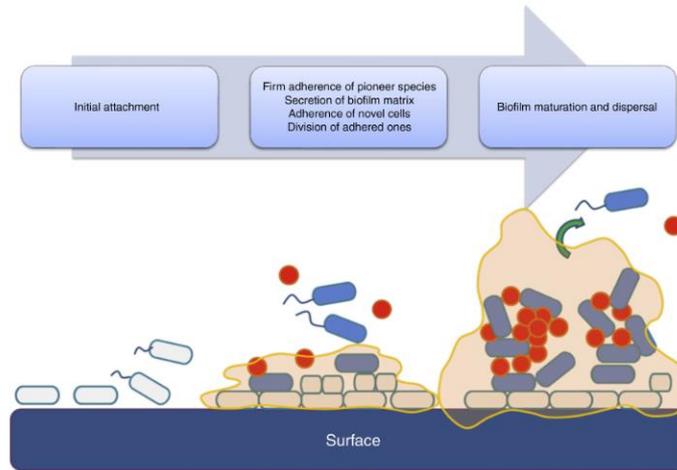
Tanpa lapisan Schmutzdecke, efisiensi penyaringan awal hanya 60%. Saat mikroorganisme melintasi Schmutzdecke, mereka akan melekat pada materi biologis yang sudah ada di lapisan atas pasir. Proses biologis yang dominan di lapisan atas filter antara lain adalah predasi, inaktivasi/kematian alami, dan degradasi metabolik. Proses-proses ini diharapkan meningkat seiring berjalannya waktu. Lapisan Schmutzdecke yang optimal memerlukan waktu sekitar satu hingga tiga minggu untuk terbentuk (Clark et al, 2012). Ketinggian lapisan ini berkisar pada 2 – 5 cm (Trikanad et al, 2023).

Ketika lapisan ini mulai mengering, pemeliharaan diperlukan untuk mencegah filter tersumbat akibat terjadinya headloss oleh biomassa. Selama pemeliharaan, lapisan schmutzdecke yang sudah kering dan lapisan atas pasir dihilangkan dengan cara dikikis 1 – 3 cm. Kemudian diganti dengan media yang sudah dibersihkan atau media baru (Huisman, L., and Wood, W, 1974).

2.10 Tahapan Pembentukan Lapisan Biofilm (*Schmutzdecke*)

Lapisan *schmutzdecke* merupakan bagian dari lapisan saringan filter lambat yang membantu dalam proses penyisihan partikel organik lebih optimal. Menurut

(Neagu et al, 2017), terdapat beberapa tahap dalam proses pembentukan lapisan ini, diantaranya:



Gambar 2.4 Proses Pembentukan Biofilm

Sumber: Neagu et al, 2017

1. Penyisipan Awal

Penyisipan awal dimulai dengan adhesi sementara bakteri bebas ke permukaan. Bakteri ini menempel dengan bantuan gaya van der Waals. Langkah ini diikuti dengan adhesi permanen bakteri ke permukaan. Bakteri awal yang menempel membantu adhesi bakteri lain dengan menyediakan tempat-tempat perekat dan mensekresikan matrix polimerik ekstraseluler.

2. Kolonisasi

Kolonisasi dimulai dengan adhesi bakteri yang lebih banyak ke permukaan. Bakteri ini menggunakan struktur adhesi sel seperti pilus dan *extracellular polymeric substances* (EPS) untuk menempel. EPS diproduksi oleh bakteri setelah bakteri melekat pada permukaan. Sel-sel bakteri mulai mensekresikan EPS, yang terdiri dari berbagai komponen seperti polisakarida, protein, dan DNA ekstraseluler (Flemming dan Wingender, 2010). Proses ini tidak hanya meningkatkan adhesi sel-sel bakteri tetapi juga menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan dan interaksi antar sel.

3. Pertumbuhan dan Pematangan

Setelah kolonisasi, bakteri berkomunikasi dalam satu sama lain dalam biofilm melalui sistem quorum sensing (QS), yang mengatur ekspresi gen dan

perilaku sel. Biofilm tumbuh melalui kombinasi proses seperti pembelahan sel dan penerimaan sel planktonik baru. Pada tahap ini, biofilm stabil dan dapat mengalami perubahan ukuran dan bentuk. Selama tahap ini, bakteri dalam biofilm mengalami perubahan fenotipik dan regulasi genetik yang berbeda dari bakteri bebas. Selama proses pertumbuhan dan maturasi, EPS berfungsi dalam melindungi biofilm dari agen antimikroba (Flemming dan Wingender, 2010).

Ketika mikroorganisme telah berkembang dengan baik, filter akan bekerja secara efisien dan menghasilkan limbah berkualitas tinggi yang memenuhi baku mutu. Waktu yang dibutuhkan agar filter matang bergantung pada kualitas air, namun suhu air dan kadar oksigen juga merupakan faktor penting.

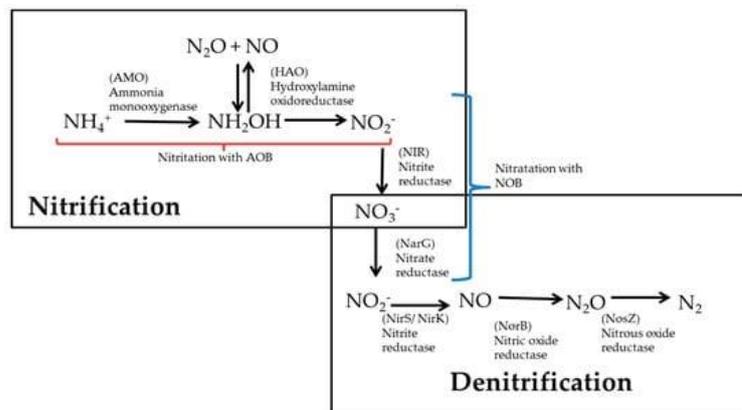
2.11 Penyisihan Limbah Laundry dalam Saringan Pasir Lambat

Sistem yang ada pada *Slow Sand Filtration* yang terdiri atas medium penyangga dan lapisan biofilm (*schmutzdecke*) memungkinkan polutan yang berada pada air limbah laundry, seperti BOD, COD, ammonia, dan fosfat, akan terdifusi pada lapisan biofilm yang menempel pada permukaan atas media. Pada waktu yang bersamaan, polutan yang ada pada limbah laundry akan diuraikan oleh mikroorganisme yang ada pada lapisan *schmutzdecke*. Suplai oksigen yang dibutuhkan bakteri dalam menguraikan polutan pada limbah berasal dari kontak dengan udara luar (Pamungkas, 2015).

Lapisan mikrobiologis yang cukup tebal pada bagian terluar akan berada pada kondisi aerob, sedangkan pada bagian dalam atau yang melekat pada media akan berada dalam kondisi anaerob. Dalam zona aerob, *ammonium* (NH_4^+) akan diubah menjadi nitrit (NO_2^-) dan nitrat (NO_3^-), atau yang biasa disebut dengan istilah reaksi nitrifikasi. Kemudian, pada zona anaerob, senyawa ini mengalami reaksi denitrifikasi menjadi senyawa nitrogen (N_2) (Said, N. I., dan Ruliasih, 2005) dalam (Pamungkas, 2015). *Ammonium* (NH_4^+) dalam limbah laundry berasal dari reaksi deterjen dengan kotoran yang berada pada kain dalam proses pembersihan pakaian (Qurrota A'yun, 2015). Melalui reaksi tersebut menunjukkan keberlangsungan adanya lapisan *schmutzdecke* (biofilm) pada proses penghilangan polutan pada air limbah yang sangat berpengaruh pada pengolahan ini.

2.12 Nitrifikasi dan Denitrifikasi

Dalam penghilangan senyawa nitrat di dalam air, dibutuhkan reaksi nitrifikasi dan denitrifikasi. Proses ini terjadi pada lapisan *biofilm* (*schmutzdecke*) yang ada pada bagian teratas filter. Nitrifikasi dan denitrifikasi terjadi secara bersamaan pada zona, yang mana terdapat jarak pendek antara zona aerobik dan anaerobik, atau yang biasa disebut dengan zona anoksik (Mutsvangwa, C. dan Matope, E, 2017).



Gambar 2.5 Proses Nitrifikasi dan Denitrifikasi
Sumber : Mpongwana, et al, 2019

Proses nitrifikasi terjadi ketika ammonia dioksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) oleh *ammonia-oxidizing bacteria* yang kemudian dioksidasi lagi dengan *nitrite-oxidizing bacteria* menjadi nitrat oksida (N_2O) dalam kondisi aerobik. Selanjutnya bakteri denitrifikasi heterotrofik memanfaatkan karbon yang ada di air sebagai sumber elektron untuk mengubah nitrit dan nitrat oksida kedalam bentuk gas nitrogen dalam kondisi anoksik (Tabraiz, et al, 2022). Konsentrasi oksigen yang berlebihan pada zona anoksik akan memperlambat laju denitrifikasi pada lapisan filter. Namun, jika kadar oksigen dalam lapisan filter sangat sedikit, akan mengganggu aktivitas mikroorganisme aerobik yang berada di lapisan atas filter (Mutsvangwa, C. dan Matope, E, 2017).

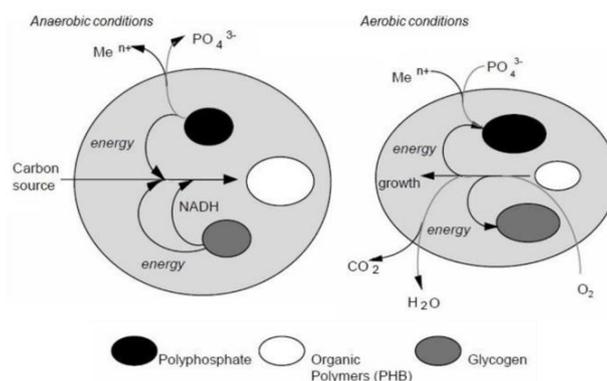
2.13 Penyisihan Fosfat pada Saringan Pasir Lambat

Menurut (Arvidsson, 2015), proses penyisihan fosfat pada biofilm atau lapisan *schmutzdecke* adalah metode biologis yang digunakan untuk menghilangkan fosfat dari limbah. Dalam proses ini, mikroorganisme seperti

bakteri *polyphosphate accumulating organisms* (PAO) dan *glycogen accumulating organisms* (GAO) berperan penting dalam proses ini.

Dalam fase aerobik, PAO mulai menggunakan karbon yang ada pada air untuk pertumbuhan, sintesis glikogen, penyerapan fosfat dan ion penyangga. Fosfat yang disimpan dalam bentuk polifosfat nantinya akan digunakan sebagai sumber energi ketika kondisinya diubah menjadi anaerobik.

Sementara pada fase anaerobic, GAO dan PAO mengambil bahan organik larut yang mudah terbiodegradasi dan menyimpannya secara intraseluler sebagai poli- γ -hidroksi-alkanoat (PHA). Energi yang dibutuhkan untuk serapan karbon diperoleh dari degradasi simpanan polifosfat poli-P) dan degradasi simpanan glikogen menjadi poli-hidroksi-butirat (PHB). Pada fase anaerobik ion penyangga dilepaskan untuk menyeimbangkan kandungan ion pada PAO. Ion penyangga yang diserap pada fase aerobik dan dilepaskan pada fase anaerobic berupa K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , dan konsentrasi ion lainnya.



Gambar 2.6 Skema Penyerapan Fosfat oleh POA dalam Keadaan Aerobik dan Anaerobik

Sumber : Arvidsson, 2015

Lebih banyak fosfat yang diserap pada tahap aerobik daripada yang dilepaskan pada tahap anaerobik karena terjadi pertumbuhan sel pada fase aerobik. Oleh sebab itu, untuk mengoptimalkan proses penyisihan fosfat, kondisi anaerob dan aerob harus diatur dengan baik. Kondisi ini dapat dicapai dengan mengatur suhu, konsentrasi karbon, dan adanya ion penyangga (Arvidsson, 2015).

2.14 Recycled Glass Sebagai Media Filtrasi

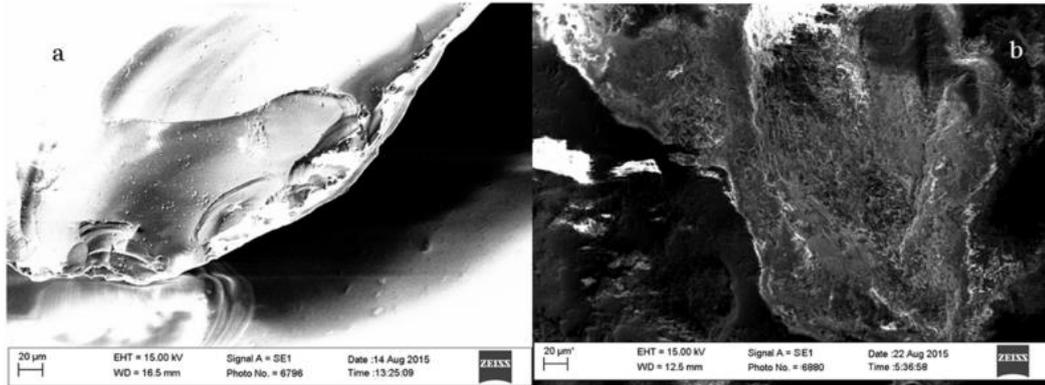
Recycled glass yang umumnya diaplikasikan dalam media filtrasi berbentuk pecahan kaca seperti bubuk atau agregat (Cescon dan Jiang, 2020). Material yang memiliki bentuk yang bersudut atau nilai *sphericity*-nya kecil, nilai porositasnya besar pada susunan *fixed-bed* (Foust et al, 1960). Pecahan kaca yang dihancurkan mempunyai banyak sudut sehingga porositasnya besar mengakibatkan headloss yang dihasilkan lebih kecil dari media pasir yang umumnya berbentuk granular (Truong et al, 2022). Penggunaan kaca ini sebagai upaya dalam mengurangi eksploitasi penggunaan pasir sebagai media filtrasi dan mengurangi limbah kaca.

Kaca memiliki permukaan yang halus bila dijadikan media filtrasi. Hal ini akan mempengaruhi penurunan headloss karena mengurangi gesekan dan memperlambat penurunan tekanan (Davies, 2012). Dengan hal ini, intensitas *backwash* akan berkurang karena fenomena clogging akan jarang terjadi sehingga mengurangi jumlah energi yang dioperasikan (Cescon dan Jiang, 2020).

2.15 Perbedaan Pasir dan *Recycled Glass* Sebagai Media Filtrasi

Karakteristik antara media pasir dan kaca sebagai media filtrasi jelas memiliki perbedaan. Pecahan kaca memiliki densitas lebih rendah dan porositas lebih tinggi dibandingkan pasir, yang berarti dapat menghasilkan head loss lebih rendah dan pengoperasian filter lebih lama (Soyer et al, 2010). *Recycled glass* yang digunakan sebagai media filtrasi juga menghasilkan *clogging* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan pasir silika. Hal ini membuat proses filtrasi menjadi lebih efisien dan umur filter menjadi lebih panjang (Bové et al., 2015).

Hal ini telah dibuktikan oleh Cescon dan Jiang (2020) yang telah melakukan analisa *scanning electron microscopy* (SEM) untuk mengetahui karakteristik dari bentuk *recycle glass* dan pasir silika. Hasil penelitian menggambarkan bahwa *recycle glass* memiliki bentuk yang lebih bersudut sedangkan pasir silika memiliki bentuk yang cenderung bulat. Dengan demikian, nilai porositas diperkirakan pada *recycle glass* lebih besar daripada pasir silika yang disebabkan oleh bentuknya yang bersudut (Droste dan Gehr, 2018). Hal ini juga telah dikonfirmasi dalam sebuah penelitian dengan nilai porositas pada pasir 0,40 dan *recycle glass* senilai 0,44, serta nilai *sphericity* pada pasir silika 0,89 dan *recycle glass* 0,687 (Bove et al, 2015).



Gambar 2.7 Analisa SEM pada *Recycle Glass* (kiri) dan Pasir Silika (kanan)
(Sumber: Cescon dan Jiang, 2020)

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan Rutledge dan Gagnon (2002), nilai porositas pada *recycled glass* lebih besar dibandingkan pasir silika yang juga disebabkan oleh bentuk yang lebih bersudut pada *recycled glass*, dengan nilai 0,47 pada pasir silika dan 0,52 pada *recycled glass*.



Gambar 2.8 Analisa SEM pada Pasir Silika (kiri) dan *Recycle Glass* (kanan)
(Sumber: Rutledge dan Gagnon 2002)

2.16 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Tahun Penelitian	Isi Penelitian	Jenis Sumber
1.	Maryam Jawad Abdulhasan, Abeer I. Alward, Risalah A. Mohammed, Waleed M. Sh. Alabdraba, Nassrin Jassim Hussien Al-Mansori	Using Crushed Glass with Sand as a Single and Dual Filter Media for Removal of Turbidity from Drinking Water	2023	Para peneliti mendirikan unit filtrasi percontohan yang mencakup tiga kolom transparan. Ini digunakan untuk menghilangkan kekeruhan dari air keruh sintetis. Filter pertama dan kedua mewakili filter media tunggal dari kaca dan pasir, masing-masing. Filter ketiga mewakili filter media ganda dari pasir di lapisan bawah dan kaca di lapisan atas. Hasilnya menunjukkan bahwa filter media tunggal kaca dan filter media ganda kaca-pasir memiliki efisiensi penghilangan maksimum kekeruhan air dibandingkan dengan filter media tunggal pasir. Secara khusus, efisiensi penghilangan maksimum dari filter kaca, filter kaca-pasir, dan filter pasir adalah 94%, 95%, dan 87%, masing-masing, pada kekeruhan influen 25 NTU dan laju filtrasi 5 m/h.	Jurnal Artikel
2.	Q. Truong, M. Ramezianpour, M. Jensen, I. Yuki	Treatment of Septic Tank Discharge Using Crushed Glass Filter Media	2021	Membandingkan kinerja kaca hancur (CG) dan pasir silika sebagai media filter untuk mengolah air limbah tangki septik. Tipe filtrasi yang mereka gunakan adalah <i>Intermittent Slow Sand Filter</i> . Para peneliti merancang dan membangun peralatan uji untuk mensimulasikan lingkungan existing	Jurnal Artikel

				dari saluran resapan. Mereka mengukur efisiensi penghilangan berbagai parameter, seperti TSS, BOD, dan fecal coliform, untuk CG dan pasir silika. Mereka menemukan bahwa CG berkinerja lebih baik daripada pasir silika dalam sebagian besar kasus, kecuali untuk fecal coliform dengan persentase tiap CG dan silika: TSS (97.1% ; 95.8), BOD (98.4 ; 97.9), dan fecal coliform (99.9 ; 99.99)	
3.	Uddin, S., Khalifa, M. R., & Alam, M. A	Grey Water Treatment Using Glass Filter Media	2019	Dalam penelitian “Grey Water Treatment Using Glass Filter Media” yang dilakukan oleh Shahab Uddin dan rekan-rekannya, media filter kaca digunakan untuk mengolah <i>grey water</i> . Sampel ini berasal dari wastafel, kamar mandi, dan mesin cuci. Tujuan utama penelitian ini adalah mengolah air limbah ini dengan membandingkan dengan media filter kaca dan pasir serta mengamati kinerjanya. Dalam penelitian ini, dua jenis media filter kaca digunakan: <i>Tempered Glass</i> (TG) dan <i>Soda Lime Silicate</i> (SLS). Sampel air dikumpulkan dari asrama mahasiswa dan rumah dosen. Berikut adalah hasil pengamatan efisiensi penghilangan polutan oleh ketiga jenis media filter, antara pasir, <i>Tempered Glass</i> (TG) dan <i>Soda Lime Silicate</i> (SLS): Peningkatan DO (54%, 60%, 64%); penghilangan warna (78%, 89%, 88%); COD (88%, 95%, 74%), BOD5	Jurnal

				(92%, 93%, 88%); kekeruhan (94%, 96%, 98%), dan Fosfat (35%, 44%, 45%).	
4.	Manish Prakash and Iswar Man Amatya	Comparative Study of Crushed Glass and Sand as Filter Media in Rapid Filter	2018	<p>Studi ini menentukan efektivitas kaca hancur (CG) sebagai media filter dalam filter cepat dibandingkan dengan pasir sebagai media filter utama. Dua kolom filter yang identik secara fisik, satu dengan CG dan yang lain dengan media pasir, dioperasikan secara paralel dengan laju filtrasi sebesar 3 m³/m²/jam dan tingkat kekeruhan influen sebagai berikut: 0-25, 25-50, 50-75, 75-100, 100-150, 150-200, 200-250, dan 250-300 NTU. Sifat-sifat kedua media filter dijaga agar sama, dengan ukuran efektif (D10) sebesar 0,56 mm dan koefisien keseragaman (UC) sebesar 1,57. Kekeruhan dan kehilangan tekanan diukur dan dibandingkan sebagai fungsi waktu. CG dan pasir menghasilkan efuen dengan kekeruhan di bawah batas bawah 5 NTU yang ditetapkan oleh NDWQS. Kehilangan tekanan setelah menghasilkan filtrat sebanyak 100 m³ per area filter untuk CG meningkat dari 0,320 menjadi 8,339 m, sedangkan untuk pasir meningkat dari 0,341 menjadi 12,158 m selama filter pertama hingga filter kedelapan, dengan kehilangan tekanan yang lebih rendah pada CG. Untuk persentase ekspansi lapisan filter yang sama sebesar 20,0%, kecepatan backwash yang dibutuhkan oleh CG 4,3% lebih rendah</p>	Jurnal Prosiding

				daripada pasir. Dengan demikian, CG dapat menjadi media filter yang efektif dalam filter cepat dan merupakan alternatif yang baik untuk pasir.	
5.	Fitriani, N., Theresia, L., O'Marga, T. T. N., Kurniawan, S. B., Supriyanto, A., Abdullah, S. R. S., & Rietveld, L. C.	Performance Of A Modified And Intermittently Operated Slow Sand Filter With Two Different Mediums in Removing Turbidity, Ammonia, and Phosphate With Varying Acclimatization Periods	2023	Studi tersebut meneliti penggunaan cangkang kerang darah sebagai alternatif potensial untuk media tradisional dalam filter pasir lambat intermiten (ISSF) untuk mengolah air limbah domestik. ISSF dioperasikan dalam siklus 16 jam hidup, 8 jam mati, berfokus pada tingkat kekeruhan, amonia, dan fosfat. Dua kombinasi media (hanya cangkang kerang darah [CC] dan pasir + cangkang kerang darah [SC]) diuji dengan dua periode aklimatisasi yang berbeda (14 dan 28 hari). Hasil menunjukkan bahwa medium SC memiliki penghilangan kekeruhan yang signifikan lebih baik dibandingkan dengan medium CC (45,99% vs. 3,79%), sementara CC memiliki penghilangan amonia (23,12% vs. 16,77%) dan fosfat (18,03% vs. 13,48%) yang sedikit lebih baik. Periode aklimatisasi 28 hari tampil lebih baik secara keseluruhan daripada periode 14 hari. Optimasi lebih lanjut diperlukan untuk memastikan tingkat amonia dan fosfat memenuhi standar nasional. Analisis SEM mengkonfirmasi pembentukan biofilm pada kedua media setelah 28 hari, dan analisis lebih lanjut pembentukan schmutzdecke diperlukan untuk hasil yang lebih komprehensif.	Jurnal

6.	Sinaga, M. S., Astuti, S. W., & Gultom, E.	Degradation of Phosphate in Laundry Waste with Biosand Filter Method.	2019	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi kandungan fosfat dan surfaktan dalam limbah laundry menggunakan metode biosand filter yang dilengkapi dengan karbon aktif. Proses aklimatisasi dilakukan dengan menjaga pH dalam kisaran 6,9-7,5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio 50%:50% memberikan hasil terbaik, dengan pengurangan fosfat mencapai 74,32% dan surfaktan 53,54%. Penurunan ini disebabkan oleh pembentukan lapisan biofilm dalam tangki biosand filter, yang berfungsi untuk mendegradasi bahan-bahan tersebut. Pengukuran COD juga menunjukkan penurunan signifikan, dari 296 mg/l menjadi 105 mg/l pada rasio campuran yang sama. Metode ini memenuhi standar baku mutu air limbah domestik sesuai dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001.</p>	Jurnal
----	--	---	------	---	--------

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu