

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Air Limbah

1. Pengertian Air Limbah

Air limbah adalah seluruh air buangan yang berasal dari hasil proses kegiatan sarana pelayanan masyarakat yang meliputi: air limbah domestik (air buangan kamar mandi, dapur, air bekas pencucian pakaian), air limbah klinis (air limbah yang berasal dari kegiatan klinis rumah sakit, misalnya air bekas cucian luka, cucian darah dan lain-lain), air limbah laboratorium dan lainnya (Mahyuddin, *et al*, 2023).

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, air limbah adalah sisa dari suatu usaha atau kegiatan yang berwujud cair. Air limbah atau air buangan adalah sisa air yang dibuang yang berasal dari rumah tangga, industri, maupun tempat-tempat umum lainnya, dan pada umumnya mengandung bahan-bahan atau zat-zat yang dapat membahayakan bagi kesehatan manusia serta mengganggu lingkungan hidup.

2. Karakteristik Air Limbah

Menurut Mahyuddin *et al* (2023), karakteristik air limbah secara umum meliputi tiga karakteristik, yaitu karakteristik fisik, kimia, dan biologi.

a. Karakteristik fisik

Ciri-ciri air limbah ditentukan oleh jenis polutan yang terkandung di dalamnya dan dapat menyebabkan perubahan secara fisik. Tingkat kekeruhan air limbah sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik yang tampak secara kasat mata. Karakteristik tersebut mencakup padatan, bau, warna, suhu, dan tingkat kekeruhan itu sendiri.

b. Karakteristik kimia

Sifat kimiawi air limbah dipengaruhi oleh kandungan bahan kimia di dalamnya, baik yang larut sebagai ion maupun yang tersuspensi dalam bentuk senyawa. Zat organik terlarut dapat mengurangi kadar oksigen terlarut dalam air serta menimbulkan rasa dan bau. Dampaknya akan menjadi lebih serius apabila zat-zat tersebut tergolong sebagai bahan beracun. Menurut Mahyudin *et. al* (2023), karakteristik kimia air limbah dikelompokkan ke dalam parameter organik, anorganik, dan gas. Parameter organik mencakup BOD (Biological Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), protein, karbohidrat, minyak dan lemak, serta deterjen. Sedangkan parameter anorganik dan gas meliputi nilai pH, tingkat alkalinitas, kandungan logam, unsur gas, nitrogen, dan fosfor.

c. Karakteristik biologi

Karakteristik biologi dalam limbah cair ditandai oleh adanya mikroorganisme yang berperan penting dalam proses pengolahan

biologis limbah. Namun, sebagian mikroorganisme tersebut dapat bersifat merugikan dan menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia. Jenis mikroorganisme tersebut meliputi bakteri, jamur, protozoa, dan alga (Mubin, *et. al*, 2016).

3. Sumber Air Limbah

Menurut Wahyudi (2022), air limbah dapat berasal dari dua sumber yaitu dari rumah tangga (domestik) atau industri.

a. Air limbah rumah tangga

Air limbah rumah tangga secara umum terdiri atas tiga polutan utama, yaitu tinja (*faeces*), air seni (*urine*), dan *grey water*. Tinja (*faeces*) mengandung bakteri *Escherichia coli* dan berpotensi mengandung mikroba patogen lainnya. Air seni (*urine*), umumnya mengandung nitrogen, *phosphor*, serta kemungkinan kecil mikroorganisme. *Grey water*, merupakan air bekas cucian dapur, mesin cuci, dan kamar mandi. *Grey water* sering juga disebut dengan istilah *sullage*.

b. Air limbah industri

Air limbah industri memiliki karakter yang berbeda-beda tergantung pada jenis industri yang menghasilkannya dan kandungan bahan kimia yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu dampak yang diberikan berbeda-beda pada tiap jenis limbah cair dan memerlukan penanganan atau pengolahan yang disesuaikan.

4. Pengolahan Air Limbah

Pengolahan air limbah merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mengurangi kadar zat pencemar di dalam air limbah hingga mencapai batas yang ditetapkan oleh standar efluen. Meskipun tersedia berbagai metode pengolahan, tidak ada satu pun yang mampu menghilangkan semua zat pencemar secara menyeluruh. Oleh karena itu, pengolahan difokuskan untuk menurunkan kadar pencemar hingga berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Sasaran utama dari proses ini adalah penurunan kadar BOD, partikel tersuspensi, dan mikroorganisme patogen. Selain itu, sistem pengolahan juga perlu dirancang agar mampu mengurangi konsentrasi nutrisi, zat beracun, dan senyawa yang sulit terurai secara signifikan.

Pengolahan air limbah umumnya dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu pengolahan awal (*pre-treatment*), pengolahan primer (*primary treatment*), dan pengolahan lanjutan (*post-treatment*). Tahap pengolahan awal bertujuan untuk menyatukan atau menyeragamkan karakteristik air limbah sebagai persiapan sebelum memasuki proses utama. Pengolahan primer kemudian dipilih dan disesuaikan berdasarkan tingkat pencemaran yang terkandung dalam air limbah. Sementara itu, tahap pengolahan lanjutan berfungsi sebagai proses akhir untuk memastikan bahwa kadar polutan dalam air limbah telah berkurang dan memenuhi standar yang ditetapkan (Mahyuddin *et. al*, 2023).

Menurut Sholichin (2012), pengolahan limbah cair digolongkan pada tiga teknik yaitu pengolahan fisik, biologi, dan kimia.

- a. Pengolahan fisik, merupakan cara pengolahan yang menerapkan proses fisik, meliputi penyaringan, pengecilan ukuran, pembuangan serpih, pengendapan dan filtrasi.

- 1) Penyaringan

Tahap ini bertujuan untuk memisahkan padatan yang tidak terlarut dengan ukuran yang relatif besar. Proses ini dapat menghilangkan bahan padat yang mengapung dalam air limbah hingga sekitar 20%. Ukuran saringan yang digunakan bervariasi, mulai dari saringan kasar dengan diameter 50 mm, saringan sedang dengan diameter 12 mm hingga 40 mm, dan saringan halus yang memiliki diameter antara 1,6 mm hingga 3 mm.

- 2) Pengecilan ukuran

Padatan kasar dihancurkan menjadi lebih kecil menggunakan alat pencacah, sehingga bahan padat tersebut dapat melewati dan masuk ke dalam kolam serpih. Kolam serpih berfungsi untuk menampung partikel anorganik, seperti kerikil, kulit telur, tulang, dan sebagainya, guna mencegah kerusakan pada pompa dan menghindari penumpukan di kolam lumpur aktif.

- 3) Pengendapan

Tahap ini bertujuan untuk menghilangkan bahan terlarut kasar dalam air limbah. Proses pengendapan dapat dilakukan

dengan cara fisik, yaitu pengendapan partikel tanpa mengubah bentuk, ukuran, atau beratnya, atau melalui pengendapan kimiawi dengan menambahkan tawas yang berfungsi sebagai koagulan.

- b. Pengolahan kimia, adalah pengolahan dengan penyeleksian kontaminan menggunakan bahan kimia seperti pengendapan kimiawi dan klorinasi.

1) Pengendapan kimiawi

Pengendapan kimiawi berfungsi untuk meningkatkan penghilangan partikel tersuspensi apabila pengendapan fisik tidak efektif. Bahan koagulan yang digunakan dalam proses ini adalah Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), yang juga dikenal sebagai tawas, serta Lime (kapur) CaO . Pengendapan kimiawi dapat berjalan efektif jika perbandingan antara volume air dan jumlah koagulan yang digunakan tepat.

2) Klorinasi

Klorinasi digunakan untuk mengurangi jumlah bakteri patogen. Proses ini bekerja dengan merusak enzim utama dalam sel bakteri, yang menyebabkan dinding sel menjadi rusak atau hancur, sehingga bakteri mati. Biasanya, klorinasi dilakukan sebagai tahap terakhir dalam pengolahan air limbah. Klorin mudah diperoleh dan efektif dalam membunuh bakteri tanpa membahayakan organisme lain. Klorin tersedia dalam bentuk gas maupun kristal garam hipoklorit.

c. Pengolahan biologi, yaitu pengolahan dengan menyingkirkan kontaminan menggunakan aktivitas biologi yang ditujukan untuk mengurangi substansi organik *biodegradable* dalam limbah cair. Pengolahan dengan cara ini dapat dilakukan pada 3 kondisi yaitu:

- 1) Proses secara aerob yang merupakan pengolahan limbah pada kondisi tersedia oksigen bagi bakteri untuk menguraikan limbah.
- 2) Proses secara anaerob, yaitu pengolahan pada kondisi tanpa adanya oksigen sehingga bakteri anaerob menguraikan zat organik menjadi gas metan dan gas CO₂.
- 3) Proses fakultatif, yaitu pengolahan limbah dimana bakteri yang ada mempunyai kemampuan adaptasi tinggi, maksudnya bakteri tersebut mampu bertahan pada kondisi aerob maupun anaerob.

B. Deterjen

1. Pengertian Deterjen

Deterjen adalah produk industri yang sangat berguna bagi masyarakat, terutama dalam menjaga kebersihan dan kesehatan tubuh. Namun, penggunaan deterjen yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan air karena kandungan bahan kimia dalam deterjen tersebut. Deterjen, yang merupakan hasil penyempurnaan dari sabun, digunakan sebagai produk pembersih. Keunggulan deterjen dibandingkan sabun terletak pada kemampuannya untuk mengatasi air sadah dan larutan asam (Apriyani, 2017).

2. Bahan Kimia Penyusun Deterjen

Deterjen mengandung sekitar 25 macam bahan yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi: (1) surfaktan, (2) *builder*, (3) *filler* dan (4) *additives* (Smulders, E., 2002). Komponen terbesar dari deterjen yaitu bahan *builders* antara 70-80%, bahan dasar sekitar 20-30%, dan bahan aditif relative sedikit antara 2-8%. Penjelasan lebih lanjut mengenai bahan kimia penyusun deterjen oleh Suprijandani, *et al* (2019) yaitu sebagai berikut:

a. Surfaktan

Surfaktan (*surface active agent*) adalah senyawa kimia yang memiliki dua ujung dengan sifat yang berbeda. Salah satu ujungnya bersifat hidrofil (menyukai air), sementara ujung lainnya bersifat hidrofob (menyukai lemak). Surfaktan merupakan bahan kimia organik dengan rantai kimia yang sulit terdegradasi atau diuraikan secara alami di lingkungan. Secara teknis, surfaktan juga dikenal sebagai emulsifier (pengemulsi) karena kemampuannya dalam menurunkan tegangan permukaan air, yang memungkinkan kotoran yang menempel pada permukaan bahan dapat terlepas.

Bagi manusia, surfaktan dapat menjadi bahan kimia yang toksik (beracun) jika terhirup, diserap melalui kulit, atau tertelan. Surfaktan juga memiliki efek samping lain, seperti menyebabkan kulit menjadi kasar, mengurangi atau menghilangkan kelembapan alami kulit, serta meningkatkan permeabilitas permukaan kulit. Sisa bahan surfaktan

yang terdapat dalam deterjen dapat membentuk senyawa chlorobenzen selama proses klorinasi. Chlorobenzen adalah senyawa beracun yang berbahaya bagi kesehatan manusia, baik jika terhirup maupun tertelan, baik dalam jangka pendek maupun panjang.

b. *Builder*

Builder (pembentuk) adalah bahan utama penyusun deterjen yang memiliki persentase jumlah paling besar dibandingkan bahan lainnya. Salah satu *builder* yang sering digunakan adalah fosfat. Secara umum, builder berfungsi untuk meningkatkan efektivitas mencuci dari surfaktan dengan menghilangkan mineral penyebab kesadahan air. Fosfat berperan sebagai *softener*, yaitu dengan menurunkan kesadahan air melalui ikatan ion kalsium dan magnesium. *Builder* lainnya yang juga sering digunakan adalah:

1) Zeolit ($\text{Na}_2\text{O}_x \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y \cdot \text{SiO}_2 \cdot z \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Zeolit adalah builder yang berfungsi sebagai penukar ion. Dalam prosesnya, ion natrium yang terkandung dalam kristal zeolit akan dipertukarkan dengan ion kalsium yang ada dalam air sadah, sehingga menciptakan kondisi yang menurunkan kesadahan air pada proses pencucian. Zeolit tipe A merupakan jenis zeolit yang paling banyak digunakan untuk kebutuhan komersial.

2) *Clay*

Clay, seperti kaolin, montmorilonit, dan *bentonite*, juga dapat digunakan sebagai *builder*. Namun, efektivitas *clay* dalam

melunakkan air masih lebih rendah dibandingkan dengan zeolit tipe A. Sebagai contoh, natrium bentonite mampu menurunkan kesadahan air karena kemampuannya dalam menyerap ion kalsium. Penggunaan *clay* sebagai *builder* juga memiliki keuntungan tambahan. *Clay* montmorilonit, misalnya, dapat berfungsi sebagai komponen pelembut, yang akan diserap dan difilter ke dalam pakaian selama proses pencucian dan pembilasan.

3) Nitrolotriactic acid

Nitrolotriactic acid atau $N(CH_2COOH)_3$ atau disebut juga NTA merupakan salah satu *builder* yang kuat dan merupakan tipe *builder* organik. Meskipun begitu, pemakaian senyawa ini memberikan efek samping yang bisa mengganggu kesehatan manusia dan lingkungan.

4) Garam netral

Beberapa jenis garam netral yang dapat digunakan sebagai *builder* antara lain natrium sulfat dan natrium klorida. Senyawa-senyawa ini tidak hanya berfungsi sebagai *builder*, tetapi juga dapat digunakan sebagai *filler* untuk mengatur berat jenis deterjen. Natrium sulfat, khususnya, dapat menurunkan *Critical Micelle Concentration* (CMC) dari surfaktan organik, yang menyebabkan konsentrasi yang tepat untuk pencucian yang efektif dapat tercapai.

c. *Filler*

Filler (pengisi) merupakan bahan tambahan deterjen yang berfungsi untuk menambah kuantitas saja tanpa memiliki kemampuan untuk meningkatkan daya cuci. Contohnya adalah sodium sulfat.

d. Aditif

Aditif adalah bahan tambahan atau suplemen yang digunakan untuk membuat produk lebih menarik, seperti pewangi, pelarut, pemutih, pewarna, dan sebagainya. Bahan ini tidak berpengaruh langsung terhadap daya cuci deterjen. Contoh aditif yang sering digunakan untuk keperluan komersial meliputi enzim, boraks, sodium klorida, dan *Carboxy Methyl Cellulose* (CMC). Beberapa aditif organik yang dapat digunakan dalam deterjen antara lain adalah:

- 1) *Natrium Carboxyl Methyl Cellulose* (Na-CMC).
- 2) *Blueing agent*.
- 3) *Fluorescent*.
- 4) *Proteolytic enzyme*.
- 5) *Bleaching agent*.
- 6) *Foam regulator*.
- 7) *Organik sequestering*.
- 8) Golongan ammonium kuartener (*alkyldimethylbenzyl-ammonium chloride, diethanolamine/DEA*).
- 9) *Chlorinated trisodium phosphate (chlorinated TSP)*.
- 10) *Sodium lauryl sulfate* (SLS).

11) *Sodium laureth sulfate* (SLES).

3. Klasifikasi Deterjen

Menurut Suprijandani *et al.* (2019), berdasarkan kandungan gugus aktifnya diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu:

a. Deterjen jenis keras

Deterjen ini merupakan jenis deterjen yang menjadi penyebab pencemaran air karena kandungannya yang sulit didegradasi oleh mikroorganisme sehingga saat bahan tersebut dibuang, zat tersebut masih aktif. Contoh: *Alkil Benzena Sulfonat* (ABS). Proses pembuatan ABS ini dengan mereaksikan *Alkil Benzena* dengan belerang trioksida, asam sulfat pekat atau oleum. Reaksi zat tersebut akan menghasilkan *Alkil Benzena Sulfonat*. Apabila memakai atau menggunakan *Dodekil Benzena* maka persamaan reaksinya adalah $C_6H_5C_{12}H_{25} + SO_3 = C_6H_4C_{12}H_{25}SO_3H$ (*Dodekil Benzena Sulfonat*). Reaksi selanjutnya berupa netralisasi dengan NaOH sehingga dihasilkan *Natrium Dodekil Benzena Sulfonat*.

b. Deterjen jenis lunak

Berbeda dengan deterjen jenis keras, deterjen jenis lunak mengandung bahan penurun tegangan permukaan yang mudah terdegradasi oleh mikroorganisme, sehingga menjadi tidak aktif setelah digunakan atau saat dibuang. Contohnya adalah Lauril Sulfat atau Lauril Alkil Sulfonat (LAS). Proses pembuatan LAS dilakukan dengan mereaksikan lauril alkohol dengan asam sulfat pekat, menghasilkan

asam lauril sulfat melalui reaksi: $C_{12}H_{25}OH + H_2SO_4 = C_{12}H_{25}OSO_3H + H_2O$. Asam lauril sulfat yang terbentuk kemudian dinetralisasi menggunakan larutan NaOH, menghasilkan natrium lauril sulfat. Deterjen jenis ini awalnya digunakan sebagai pembersih pakaian, namun kini juga banyak dijumpai dalam produk-produk lain, seperti:

- 1) *Personal cleaning product.*
- 2) *Laundry.*
- 3) *Dishwashing product.*
- 4) *Household cleaner.*

Deterjen yang beredar luas di pasaran umumnya mengandung bahan aktif seperti LAS (*Linear Alkylbenzene Sulfonate*), yaitu senyawa turunan dari minyak bumi. Surfaktan jenis LAS sulit terurai secara alami oleh bakteri, sehingga penggunaannya dalam deterjen dapat menimbulkan masalah lingkungan akibat akumulasi surfaktan di perairan, yang berpotensi mencemari ekosistem air. Kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan lingkungan serius, terutama pada kehidupan akuatik. Selain itu, muncul pula kekhawatiran terhadap ketersediaan minyak bumi sebagai bahan baku utama LAS karena termasuk dalam sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan jumlahnya semakin menurun.

C. Air Limbah Deterjen

Penggunaan deterjen menghasilkan limbah yang dapat mencemari badan air apabila air bekas cucian dibuang langsung ke lingkungan tanpa melalui

proses pengolahan. Pada formulasi awalnya, deterjen mengandung surfaktan yang tidak mudah terurai secara biologis (*nonbiodegradable*). Air limbah dari deterjen dianggap sebagai polutan karena mengandung zat ABS (*Alkyl Benzene Sulfonate*), yang termasuk dalam kategori bahan kimia keras. Surfaktan sebagai komponen utama dalam deterjen memiliki struktur rantai kimia yang sulit diuraikan secara alami oleh lingkungan (Sutanto, 1996).

1. Standar Baku Mutu Air Limbah Deterjen

Sebagai upaya untuk menjaga kelestarian lingkungan, air limbah yang dihasilkan oleh badan usaha wajib diolah terlebih dahulu hingga kandungan bahan berbahayanya berada pada tingkat yang aman sebelum dibuang ke lingkungan. Ketentuan mengenai standar kualitas air limbah untuk berbagai jenis usaha, termasuk industri sabun, deterjen, dan produk berbasis minyak nabati, telah ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Dalam lampiran X diketahui bahwa baku mutu bagi air limbah deterjen meliputi beberapa parameter sesuai dengan tabel berikut.

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Limbah Deterjen

No	Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)
1	BOD	75
2	COD	180
3	TSS	60
4	Miyak dan Lemak	15
5	Fosfat (PO ₄)	2
6	MBAS (<i>Methylen Blue Active Surfactant</i>)	3
7	pH	3

Masing-masing parameter tersebut memiliki sifat dan memberikan dampak yang berbeda-beda pada kualitas lingkungan air. Penjelasan mengenai masing-masing parameter adalah sebagai berikut:

a. BOD (*Biological Oxygen Demand*)

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) merupakan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan mikroorganisme untuk mengurai bahan organik dalam kondisi aerobik (Pungus, *et al.*, 2019). Nilai BOD memiliki pengaruh besar terhadap keseimbangan ekosistem air karena air limbah dengan BOD yang tinggi tidak dapat mendukung kehidupan organisme yang membutuhkan oksigen. BOD yang tinggi juga merupakan indikasi penipisan oksigen dari air limbah dan kondisi anaerobik dalam air limbah (Bhutiani *et al.*, 2019).

b. COD (*Chemical Oxygen Demand*)

COD (*Chemical Oxygen Demand*) atau Kebutuhan Oksigen Kimiawi (KOK) adalah ukuran jumlah oksigen dalam satuan ppm atau mg/L yang dibutuhkan untuk menguraikan senyawa organik dalam air limbah melalui proses oksidasi kimia di bawah kondisi tertentu. Pengujian COD bertujuan untuk mengetahui jumlah bahan organik yang dapat dioksidasi secara kimia, biasanya menggunakan larutan asam yang mengandung dikromat. Nilai COD yang tinggi menunjukkan tingginya kandungan bahan organik, yang pada akhirnya dapat menurunkan kadar oksigen terlarut dalam air. (Sami, 2012).

COD memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan DO (*Dissolved Oxygen*) atau oksigen terlarut. Semakin rendah kadar oksigen terlarut dalam air, maka nilai COD akan semakin tinggi. Tingginya nilai COD menunjukkan bahwa jumlah zat organik di dalam air sangat besar. Zat organik ini akan mengonsumsi oksigen dan mengubahnya menjadi karbon dioksida serta air, yang menyebabkan kekurangan oksigen dalam perairan. Kondisi ini menjadi indikator tingkat pencemaran limbah cair, baik dari sumber domestik maupun industri. Semakin rendah kadar DO, semakin tinggi tingkat pencemaran organik di lingkungan perairan tersebut. (Prahutama, 2013).

c. TSS (*Total Suspended Solid*)

Menurut penelitian yang dilakukan Sumantri (2011) mengenai dampak limbah domestik perumahan terhadap kualitas air ekosistem penerimanya dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat diketahui bahwa konsentrasi TSS (*Total Suspended Solid*) yang tinggi di perairan dapat menghambat penetrasi cahaya sehingga mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik. TSS terdiri dari partikel padat yang menyebabkan kekeruhan, tidak larut dalam air, dan tidak mudah mengendap secara langsung. Padatan ini umumnya berasal dari bahan organik dalam air limbah, seperti selulosa, lemak, protein, serta mikroorganisme (Yudo, 2018).

d. Minyak dan lemak

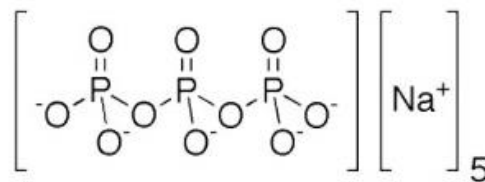
Minyak dan lemak merupakan salah satu parameter penting yang memiliki batas konsentrasi maksimum yang harus dipenuhi dalam air limbah industri maupun air permukaan. Jika limbah cair tidak ditangani dengan baik, dampaknya terhadap perairan terutama terhadap sumber daya air bisa sangat serius. Kandungan minyak dan lemak yang tinggi dapat merusak ekosistem akuatik dan mengganggu keseimbangan lingkungan perairan (Abuzar, *et. al*, 2012).

Minyak dan lemak merupakan senyawa yang dapat menyebabkan pencemaran di perairan sehingga konsentrasinya perlu dibatasi. Karena memiliki berat jenis yang lebih ringan daripada air, minyak akan membentuk lapisan tipis di permukaan perairan. Lapisan ini dapat menghambat proses masuknya oksigen bebas ke dalam air sehingga menurunkan kadar oksigen terlarut. Selain itu lapisan minyak juga menghalangi sinar matahari masuk ke dalam air yang pada akhirnya mengganggu proses fotosintesis dan menyebabkan ketidakseimbangan dalam rantai makanan. Minyak dan lemak termasuk senyawa organik yang stabil dan sulit diuraikan oleh aktivitas bakteri alami (Andreozzi, *et. al*, 2000).

e. Fosfat (PO_4)

Komponen terbesar kedua dalam formulasi deterjen adalah *builder* yang berperan penting dalam meningkatkan kinerja surfaktan. *Builder* bekerja dengan melunakkan air sadah melalui pengikatan

mineral-mineral terlarut seperti kalsium dan magnesium. Selain itu *builder* juga membantu menciptakan kondisi asam yang optimal untuk proses pembersihan serta menjaga kotoran yang telah terlepas agar tetap tersuspensi dalam larutan. Beberapa senyawa kompleks yang umum digunakan sebagai *builder* meliputi natrium silikat, natrium karbonat, natrium sitrat, zat pencerah (*fluorescent*), dan fosfat (Hudori, 2009).



Gambar 2.1 Struktur Sodium Tripolifosfat

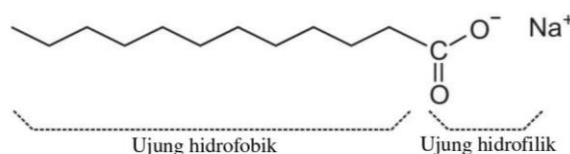
Sodium Tripolifosfat (STPP) merupakan salah satu jenis *builder* yang umum digunakan dalam formulasi deterjen. STPP bekerja dengan meningkatkan efektivitas surfaktan selama proses pencucian melalui reaksi kimia dengan ion magnesium dan kalsium yang terdapat dalam air. Kedua ion tersebut dapat mengurangi kinerja surfaktan, sehingga perlu dinetralsir. Hasil dari reaksi ini adalah terbentuknya padatan serta senyawa fosfat lain yang membantu mencegah kotoran menempel kembali pada permukaan yang dibersihkan. Jumlah padatan yang terbentuk tergantung pada tingkat kesadahan air. Semakin tinggi kesadahan semakin banyak padatan yang dihasilkan dan sebaliknya (Apriyani, 2017).

Deterjen yang mengandung fosfat akan menghasilkan limbah yang mengandung polifosfat, yang merupakan salah satu bentuk dari fosfor selain fosfor organik dan orthofosfat (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}). Fosfat merupakan bentuk senyawa fosfor yang sangat penting bagi kehidupan akuatik. Namun, apabila terkandung dalam jumlah yang berlebihan fosfat dapat menyebabkan eutrofikasi, yaitu pengkayaan unsur hara yang berlebihan yang pada gilirannya dapat memicu pertumbuhan alga yang tidak terkendali. Meskipun fosfat tidak bersifat toksik, akumulasi fosfat yang berlebihan dalam air dapat mengganggu proses penguraian biologis. Hal ini terjadi karena pertumbuhan alga yang berlebihan di permukaan air akan menghambat transfer oksigen yang pada akhirnya memperlambat proses penguraian bahan organik dalam air (Widiyani, 2010).

f. Surfaktan

Surfaktan (*surface active agents*) adalah senyawa yang berfungsi untuk mengangkat kotoran dari pakaian baik yang larut dalam air maupun yang tidak larut dengan cara menurunkan tegangan permukaan air. Proses ini terjadi karena molekul surfaktan memiliki dua ujung dengan sifat berbeda, yaitu ujung hidrofilik yang menarik air dan ujung hidrofobik yang menghindari air. Biasanya berupa satu atau lebih rantai hidrokarbon. Ujung hidrofobik surfaktan terdiri dari rantai hidrokarbon dengan setidaknya 12 atom karbon (Apriyani, 2017).

Istilah *surface active agent* atau surfaktan merujuk pada molekul atau ion yang dapat teradsorpsi pada permukaan antarmuka. Surfaktan juga dikenal sebagai amfifil karena molekul atau ionnya memiliki afinitas terhadap kedua sifat, yaitu polar dan non-polar. Hal ini bergantung pada jumlah dan karakteristik gugus-gugus polar dan non-polar yang ada. Amfifil dapat memiliki sifat hidrofilik (menyukai air), lipofilik (menyukai minyak), atau memiliki keseimbangan antara kedua sifat tersebut. Struktur surfaktan dapat digambarkan pada gambar berikut.



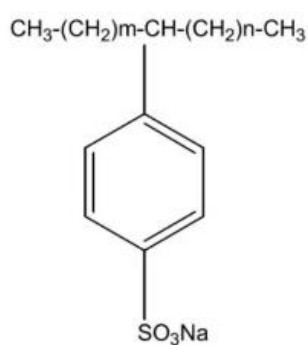
Gambar 2.2 Struktur Surfaktan

Surfaktan dikelompokkan menjadi empat kelompok yaitu anionic, nonionik, kationik, dan zwitterionik atau amfoterik (Smulders, E., 2002) Contoh surfaktan ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 2.2 Contoh Surfaktan

Surfaktan	Rumus Molekul	Jenis
Alkil (polietilen) glikol ether	$\text{RO} - (\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O})_n\text{H}$	Nonionik
Alkil sulfonat	$\text{RO} - \text{SO}_3\text{Na}^+$	Anionik
Dialkil dimetil ammonium klorida	$[\text{H}_3\text{C} - \text{N}^+(\text{R})_2 - \text{CH}_3]\text{Cl}^-$	Kationik
Betaines	$\text{R} - \text{N}^+(\text{CH}_3)_2 - \text{CH}_2 - \text{COO}^-$	Amfoterik

Jenis surfaktan yang paling sering digunakan dalam kegiatan *laundry* adalah surfaktan anionik karena proses pembuatannya yang mudah dan biaya yang relatif murah. Surfaktan anionik yang umum digunakan antara lain *Alkyl Benzene Sulfonates* (ABS) dan *Linear Alkyl Sulfonates* (LAS). ABS dikenal sebagai senyawa yang toksik bagi biota air karena sifatnya yang sulit terurai secara biologis. Oleh karena itu, penggunaannya digantikan oleh LAS pada tahun 1965. LAS efektif digunakan sebagai pelarut lemak dan untuk denaturasi protein karena kemampuannya dalam menurunkan tegangan permukaan dan mengemulsi lemak. Selain itu jenis surfaktan lain seperti Nonylphenol dan Sodium Lauryl Ether Sulphate yang termasuk dalam kelompok surfaktan nonionik juga digunakan sebagai pembersih (Apriyani, 2017).



Gambar 2.2 Struktur *Linear Alkyl Benzene Sulfonates*; LAS:
 $\text{C}_n\text{H}_{2n} - \text{SO}_3\text{Na}$ ($n = 16-20$, untuk produk komersial)

g. pH (*Potential Hydrogen*)

pH merupakan variabel penting dalam upaya menjaga kualitas air. *Potential Hydrogen* (pH) adalah indeks konsentrasi ion *hydrogen* ($[H^+]$) dalam air, dimana $[H^+]$ mempengaruhi sebagian besar proses kimia dan biologi dalam air. Secara umum pH digunakan untuk menyatakan tingkatan keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh sesuatu zat, larutan atau benda (Boyd, dkk, 2011). Nilai pH suatu limbah dapat bervariasi tergantung pada senyawa kimia yang terkandung di dalamnya. Kondisi pH yang tepat sangat penting untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air limbah baik melalui proses biologis maupun kimiawi. Oleh karena itu pengukuran pH menjadi hal yang krusial, terutama dalam sektor yang berhubungan dengan kehidupan atau industri pengolahan kimia. Air murni bersifat netral dengan pH yang ditetapkan pada 7 pada suhu 25°C. Larutan dengan pH di bawah 7 dianggap asam sementara larutan dengan pH lebih dari 7 bersifat basa atau alkali (Zulius, 2017).

2. Dampak Limbah Deterjen terhadap Lingkungan dan Kesehatan Manusia

a. Dampak Deterjen terhadap Lingkungan

Limbah deterjen dapat memengaruhi kondisi fisik dan kimia perairan yang dilaluinya baik secara langsung maupun tidak langsung. Beberapa dampak deterjen terhadap lingkungan antara lain penurunan estetika akibat adanya busa putih di permukaan air, penurunan kadar

oksigen terlarut, perubahan sifat fisik dan kimia air, serta terjadinya eutrofikasi karena pengayaan unsur hara. Kandungan fosfat yang tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan gulma air yang sangat pesat. Peningkatan gulma ini akan meningkatkan proses penguraian fosfat dan menghambat pertukaran oksigen dalam air sehingga mengurangi kadar oksigen terlarut yang menyebabkan kondisi mikroaerofil. Rendahnya kadar oksigen ini juga mengganggu proses respirasi ikan yang dapat berujung pada kematian ikan dan memberikan dampak negatif besar bagi keseluruhan ekosistem perairan. (Yuliani *et al.*, 2015).

b. Dampak Deterjen terhadap Kesehatan Manusia

Meskipun deterjen memberikan manfaat sebagai pembersih yang efektif dan murah, tidak dapat dipungkiri bahwa penggunaan deterjen juga memberikan dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan. Terutama dua bahan utama deterjen yaitu surfaktan dan *builder*, diidentifikasi mempunyai pengaruh langsung dan tidak langsung terhadap manusia dan lingkungannya.

Pada deterjen anionik, terdapat bahan tambahan (*builder*) seperti golongan ammonium kuartener misalnya *alkyldimethylbenzyl-ammonium chloride*, *diethanolamine* (DEA), *chlorinated trisodium phosphate* (*chlorinated* TSP), dan beberapa jenis surfaktan seperti *sodium lauryl sulfate* (SLS), *sodium laureth sulfate* (SLES), atau *linear alkyl benzene sulfonate* (LAS). Golongan ammonium kuartener dapat menghasilkan senyawa *nitrosamine*, yang diketahui bersifat

karsinogenik dan dapat menyebabkan kanker. Senyawa seperti SLS, SLES, atau LAS mudah bereaksi dengan bahan golongan ammonium kuartener, seperti DEA, untuk membentuk *nitrosamine*. SLS juga diketahui dapat menyebabkan iritasi pada kulit, memperlambat proses penyembuhan luka, dan dapat menyebabkan katarak pada mata orang dewasa (Suprijandani *et al.*, 2019).

3. Pengolahan Limbah Deterjen

Pengolahan limbah deterjen dalam bentuk degradasi surfaktan telah banyak ditemukan melalui berbagai penelitian. Menurut Apriyani (2017), metode pengolahan limbah deterjen dapat dikelompokkan menjadi: (1) biodegradasi, (2) elektrokoagulasi, (3) *membrane* dan (4) biofilter.

a. Biodegradasi

1) Biodegradasi dengan mikroorganisme

Biodegradasi dalam pengolahan limbah adalah metode pengolahan secara biologis di mana senyawa organik terurai melalui proses oksidasi yang dilakukan oleh mikroorganisme baik di perairan, tanah, maupun dalam instalasi pengolahan air limbah. Proses ini terjadi karena mikroorganisme, seperti bakteri, memetabolisme zat organik dengan bantuan enzim yang menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi. (Apriyani, 2017).

Pada metode pengolahan limbah cair dengan lumpur aktif, LAS dapat dibiodegradasi hingga 95-99,9%. Biodegradasi LAS dapat dilakukan pada kondisi aerobik pada media yang mengandung

air, meskipun sejumlah 20-25% fraksi penting terimobilisasi dalam limbah padat dan persisten dalam kondisi aerobik. Dalam kondisi anaerobik, sangat sedikit LAS yang dapat didegradasi. Hal ini terjadi karena rantai alifatik tidak dapat direduksi lebih lanjut (Peinado, 2009)

2) Biodegradasi dengan enzim

Biodegradasi polutan air menggunakan enzim merupakan salah satu metode yang efektif untuk remediasi air. Enzim yang paling sering digunakan dalam proses ini adalah kelompok oksidoreduktase yang mencakup enzim seperti laccase dan peroksidase. Enzim laccase sendiri banyak ditemukan di alam, terutama pada tumbuhan dan jamur (*fungi*), dan memiliki potensi besar dalam aplikasi bioteknologi karena kemampuannya dalam mengoksidasi berbagai jenis senyawa, baik yang bersifat fenolik maupun non-fenolik. Penelitian yang dilakukan oleh Asadgol *et al.* (2014) berhasil menunjukkan bahwa enzim lakase dapat mendegradasi bisfenol A, pengganggu endokrin, menggunakan enzim lakase murni dari *Paraconiothyrium variabile* (PvL). Setelah 30 menit perlakuan, enzim tersebut berhasil mendegradasi sekitar 60% polutan.

Enzim oksidoreduktase lainnya yang juga digunakan dalam proses remediasi air adalah peroksidase. Enzim ini secara alami banyak ditemukan pada tumbuhan dan mikroorganisme. Peroksidase

memiliki beberapa karakteristik khas, di antaranya adalah stabilitas terhadap suhu tinggi (stabilitas termal) dan kemampuan redoks yang tinggi menjadikannya efektif dalam proses penguraian polutan (Al-Maqdi, 2021). Penelitian yang dilakukan Al-Maqdi *et al.* (2017) berhasil menunjukkan bahwa penggunaan enzim dalam remediasi air dianggap sebagai alternatif yang lebih aman dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode konvensional. Sebagai contoh, kemampuan enzim kloroperoksidase (CPO) dalam mendegradasi polutan tiazol menunjukkan hasil yang lebih unggul jika dibandingkan dengan metode kombinasi sinar UV dan hidrogen peroksida (H_2O_2). Studi menunjukkan bahwa CPO menghasilkan senyawa antara yang jauh lebih rendah tingkat toksisitasnya dibandingkan dengan senyawa antara yang terbentuk melalui metode UV + H_2O_2 .

b. Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi merupakan metode untuk menghilangkan kontaminan dalam bentuk suspensi, emulsi, maupun larutan, dengan cara mengalirkan arus listrik melalui air. Proses ini menghasilkan gumpalan partikel yang lebih mudah dipisahkan. Elektrokoagulasi merupakan kombinasi dari proses elektrokimia dan koagulasi-flokulasi. Surfaktan dapat disisihkan melalui mekanisme ini karena partikel surfaktan teradsorpsi ke permukaan partikel koagulan, membentuk permukaan yang bersifat hidrofobik. Akibatnya partikel-partikel

tersebut terdorong naik ke permukaan air limbah terbantu oleh gelembung gas yang terbentuk selama proses berlangsung (Ge, 2004).

c. Membran

Membran merupakan lapisan tipis yang berada di antara dua fase fluida, yaitu fase umpan (*feed*) dan fase permeat, dan berfungsi sebagai penghalang terhadap spesies tertentu. Membran bekerja dengan memisahkan zat berdasarkan perbedaan ukuran di mana partikel yang lebih besar dari ukuran pori akan tertahan sedangkan partikel yang lebih kecil dapat melewatinya. Karena kemampuannya ini, membran disebut bersifat semipermeabel. Sifat selektif inilah yang dimanfaatkan dalam berbagai proses pemisahan. (Apriyani, 2017).

d. Biofilter

Biofilter merupakan jenis reaktor yang bekerja berdasarkan prinsip pertumbuhan mikroorganisme pada media filter di mana mikroba membentuk lapisan biofilm (pertumbuhan melekat). Proses ini dilakukan dengan mengalirkan air limbah ke dalam reaktor biologis yang telah diisi dengan media penyangga sebagai tempat berkembang biaknya mikroorganisme. Zat pencemar dalam air limbah, seperti fosfor, akan berdifusi ke dalam lapisan biofilm yang menempel pada permukaan media tersebut (Slamet dan Masqudi, 2000).

D. Ekoenzim

1. Pengertian Ekoenzim

Ekoenzim adalah larutan organik kompleks yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik, gula molase, dan air selama 90 hari (Low *et al.*, 2021). Proses fermentasi ini menghasilkan berbagai macam senyawa, meliputi alkohol, cuka, dan enzim, yang memiliki peran penting dalam mendegradasi polutan pencemar dalam air limbah (Nazim *et al.*, 2013). Ekoenzim mengandung asam asetat sehingga sifatnya asam dengan nilai pH optimal ≤ 4 . Warna ekoenzim dapat bervariasi dari coklat muda sampai coklat tua tergantung pada bahan organik yang digunakan. Jenis sampah organik yang biasa digunakan untuk pembuatan ekoenzim yaitu sampah buah dan sayur, sehingga pemanfaatan sampah organik menjadi ekoenzim ini juga dapat membantu dalam mengurangi timbulan sampah organik di TPA (Tempat Pembuangan Akhir) yang juga dapat mengurangi efek gas rumah kaca (Wulandari, 2024).

2. Bahan Pembuat Ekoenzim

Ekoenzim terbuat dari fermentasi campuran tiga bahan, yaitu bahan organik, gula molase, dan air dengan perbandingan 3:1:10. Untuk pembuatan ekoenzim, penggunaan gula pasir tidak dianjurkan karena gula pasir termasuk zat kimia sehingga dianjurkan untuk memakai gula molase dalam bentuk cair ataupun kering, gula aren, gula kelapa, dan gula lontar. Sementara bahan organik yang dipakai dapat berupa sampah makanan (buah dan sayur jenis apa saja) yang masih segar tanpa melalui proses

masak (direbus, digoreng, ditumis). Selain itu, bahan organik yang dipakai tidak boleh dalam keadaan busuk, berulat, dan berjamur. Dalam penelitian ini, bahan organik yang dipakai yaitu kulit buah pepaya.

a. Klasifikasi pepaya (*Carica papaya*)

Pepaya (*Carica papaya*), merupakan tanaman asli Amerika tropis yang bersal dari persilangan alami *Carica peltata* Hook. & Arn. Dan sekarang tersebar luas di seluruh daerah tropis dan subtropic di seluruh dunia, termasuk Indonesia (Ningsih, 2020). Tanaman pepaya berasal dari Amerika Tengah dan Hindia Barat, bahkan kawasan sekitar Meksiko dan Costa Rica (Putra & Gusmarwani, 2021). Klasifikasi pepaya tanaman pepaya menurut *Integrated Taxonomic Information System* (ITIS) (2022), tanaman pepaya dengan nomor seri taksonomi 22324 memiliki klasifikasi sebagai berikut:

<i>Kingdom</i>	: <i>Plantae</i>
<i>Division</i>	: <i>Trachaeophyta</i>
<i>Subdivision</i>	: <i>Spermatophyta</i>
<i>Class</i>	: <i>Magnoliopsida</i>
<i>Order</i>	: <i>Brassicales</i>
<i>Family</i>	: <i>Caricaeae</i>
<i>Genus</i>	: <i>Carica</i>
<i>Species</i>	: <i>Carica papaya</i>

b. Kandungan pepaya

Kulit buah pepaya (*Carica papaya*) memiliki kandungan yang kurang lebih hampir sama dengan daging buahnya. Kulit buah pepaya mengandung senyawa antibakteri seperti alkaloid, tanin, steroid, saponin, dan flavonoid. Flavonoid merupakan golongan terbesar dari senyawa fenolik yang dapat mencegah pertumbuhan bakteri, jamur, dan virus. Dengan membuat protein lebih terdenaturasi, flavonoid mampu meningkatkan permeabilitas membrane sel. Dalam penelitian Widyastuti (2023) mengenai pemanfaatan ekoenzim dalam menurunkan parameter air limbah *laundry* diketahui bahwa ekoenzim dengan menggunakan sampah organik kulit semangka, kulit pepaya, batang bayam, sawi hijau dan kubis menghasilkan ekoenzim yang dapat menurunkan kadar surfaktan, nitrogen, dan fosfat karena enzim yang terkandung didalamnya dapat berperan menjadi biokatalisis dalam proses degradasi parameter tersebut.

3. Mikroorganisme dalam Ekoenzim

Dalam proses fermentasi pembuatan ekoenzim, berbagai jenis mikroba alami tumbuh dan berkembang. Mikroba ini berasal dari lingkungan sekitar, bahan organik seperti buah-buahan, serta udara selama fermentasi berlangsung. Mikroba tersebut meliputi:

Tabel 2. 3 Jenis Mikroba dalam Ekoenzim

Jenis Mikroba	Contoh Genus	Fungsi Utama
Bakteri asam laktat	Lactobacillus	Produksi asam, pengawetan, enzim

Bakteri proteolitik	Bacillus	Penghasil enzim (lipase, protease, amilase)
Bakteri degradasi surfaktan	Pseudomonas, Acinobacter, Clostridium.	Penguraian senyawa hidrokarbon dan surfaktan
Ragi dan jamur	Saccharomyces, Aspergillus.	Fermentasi, penghasil enzim tambahan
Bakteri fotosintetik	Rhodopseudomonas	Degradasi senyawa organik kompleks
Methanogen	Methanosaeta, Methanobacterium	Penghasil gas metana (CH ₄) melalui proses metabolisme anaerob (tanpa oksigen).

E. Ekoenzim sebagai Biokatalisator

1. Ekoenzim sebagai Biokatalisator Proses Degradasi Surfaktan Secara Anaerob

Ekoenzim merupakan larutan organik kompleks yang dihasilkan dari fermentasi bahan organik sehingga di dalamnya mengandung berbagai macam enzim seperti enzim lipase, amilase, dan protease (Galintin, 2021). Enzim-enzim ini memiliki sifat sebagai biokatalisator yang dapat mempercepat laju reaksi degradasi berbagai polutan (Pratamadina, 2022). Dengan faktor tersebut, ekoenzim dianggap efektif dalam menguraikan polutan yang merusak keseimbangan ekosistem air (Pranata, 2021).

Enzim amilase, lipase, dan protease dalam ekoenzim membuat ekoenzim terbukti sebagai enzim aktif yang dapat mendegradasi lemak dan minyak, protein, dan karbohidrat. Amilase berperan sebagai katalisator dalam hidrolisis pati dan glikogen menjadi glukosa dan maltose. Lipase menghidrolisis gliserida atau minyak dan lemak, menjadi asam lemak.

Protease dapat membantu proses biodegradasi senyawa organik menjadi gas metana (Arun, 2015). Ekoenzim memiliki kandungan karbohidrat yang berlimpah. Karbohidrat ini kemudian dimetabolisme menjadi asam volatile dan asam organik sehingga ekoenzim akan bersifat asam atau memiliki pH dengan nilai yang rendah baik untuk ekoenzim yang berasal dari buah maupun sayuran atau campuran keduanya (Pebriani, 2022).

Fermentasi pada bahan organik dapat terjadi karena adanya aktivitas mikroorganisme. Umumnya, bahan organik dapat diklasifikasikan ke dalam tiga golongan berdasarkan komposisi kimianya. Golongan pertama mencakup bahan yang mengandung gula seperti molase, gula tebu, gula bit, dan sari buah. Golongan kedua meliputi bahan yang mengandung pati, seperti biji-bijian contohnya gandum, kentang, pisang dan nanas. Sedangkan golongan ke-tiga terdiri atas bahan yang mengandung serta atau selulosa seperti kayu dan beberapa limbah pertanian (Sari, 2017). Dalam proses fermentasi, glukosa akan diubah menjadi asam piruvat dan dalam kondisi aerobik, asam pirivat akan dirombak oleh enzim piruvat dekarboksilase menjadi asetaldehid. Selanjutnya, asetaldehid akan diubah menjadi asam asetat (Axmalia, 2020).

Proses pengolahan biokimiawi secara anaerobik melibatkan bakteri anaerob yang tidak memerlukan oksigen untuk hidup dan enzim yang dihasilkannya. Secara umum, biodegradasi atau penguraian bahan organik oleh mikroorganisme terjadi melalui perubahan struktur molekuler senyawa organik. Dalam proses anerobik, penguraian senyawa organik berlangsung

melalui beberapa tahapan. Tahapan pertama adalah hidrolisis, dimana bakteri saprofitik menguraikan bahan organik kompleks seperti polisakarida, lemak, protein, dan karbohidrat yang tidak larut. Enzim ekstraseluler membantu mengubahnya menjadi bahan organik yang larut dalam air. Tahapan kedua adalah asidogenesis, dimana bakteri asidogenik mengubah bahan organik yang larut menjadi asam organik rantai pendek seperti asam butirat, sama propionate, asam amino, asam asetat, dan asam lainnya. Tahapan terakhir adalah metagnogenesis, dimana bakteri metanogenik mengubah asam organik tersebut menjadi gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) (Lazuardi *et al.*, 2024).

Degradasi surfaktan oleh ekoenzim dapat terjadi karena struktur surfaktan yaitu gugus hidrofobik memiliki afinitas rendah terhadap air dan cenderung berinteraksi dengan molekul non polar lainnya contohnya minyak dan lemak, dan sebagian besar senyawa hidrokarbon sehingga membentuk pola ikatan yang kompleks. Kondisi inilah yang dapat memudahkan enzim dalam mendegradasi surfaktan karena kecenderungan surfaktan untuk berikatan senyawa kompleks lainnya seperti senyawa-senyawa ekoenzim (Lazuardi *et al.*, 2024).

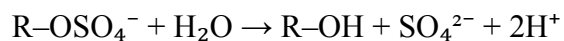
2. Proses Kimia Degradasi Surfaktan oleh Ekoenzim

Ekoenzim mengandung berbagai mikroorganisme, enzim, dan senyawa bioaktif yang berperan dalam proses biodegradasi, termasuk degradasi surfaktan. Menurut Merrenttig-Bruns (2009), proses degradasi surfakatan oleh ekoenzim melibatkan beberapa tahap:

a. Hidrolisis oleh enzim (utamanya lipase atau esterase)

Surfaktan merupakan senyawa hidrokarbon yang memiliki ikatan ester/eter atau gugus alkil. Ikatan tersebut akan mengalami pemutusan pada tahap hidrolisis oleh enzim.

Reaksi umum:



Dalam reaksi tersebut, enzim memutus ikatan alkil dan sulfat dalam surfaktan, menghasilkan alkohol (R-OH) dan ion sulfat.

b. Oksidasi alkohol oleh mikroba atau enzim oksidase

Setelah menghasilkan alkohol (misalnya lauril alkohol), mikroba akan mengoksidasi alkohol menjadi menjadi aldehida dan asam lemak pendek yang bersifat lebih mudah terurai secara biologis.

Reaksi umum:

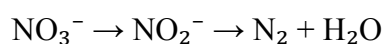


c. Mineralisasi oleh mikroba

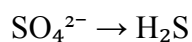
Asam lemak yang dihasilkan dari proses oksidasi kemudian dimetabolisme lebih lanjut melalui jalur β -oksidasi oleh mikroba menghasilkan Acetyl-CoA, yang selanjutnya diolah dalam siklus Krebs menjadi CO_2 , H_2O dan energi.



Jika nitrat tersedia (tanpa oksigen), alkohol/asam akan dioksidasi, menghasilkan:

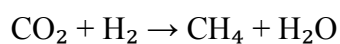


Atau dalam kehadiran sulfat sebagai akseptor elektron:

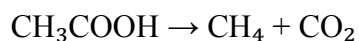


d. Metanogenesis

Beberapa produk fermentasi (H_2 , CO_2 , asam asetat) digunakan oleh mikroba methanogen menjadi CH_4 . Apabila dituliskan rumus reaksinya adalah sebagai berikut.



atau



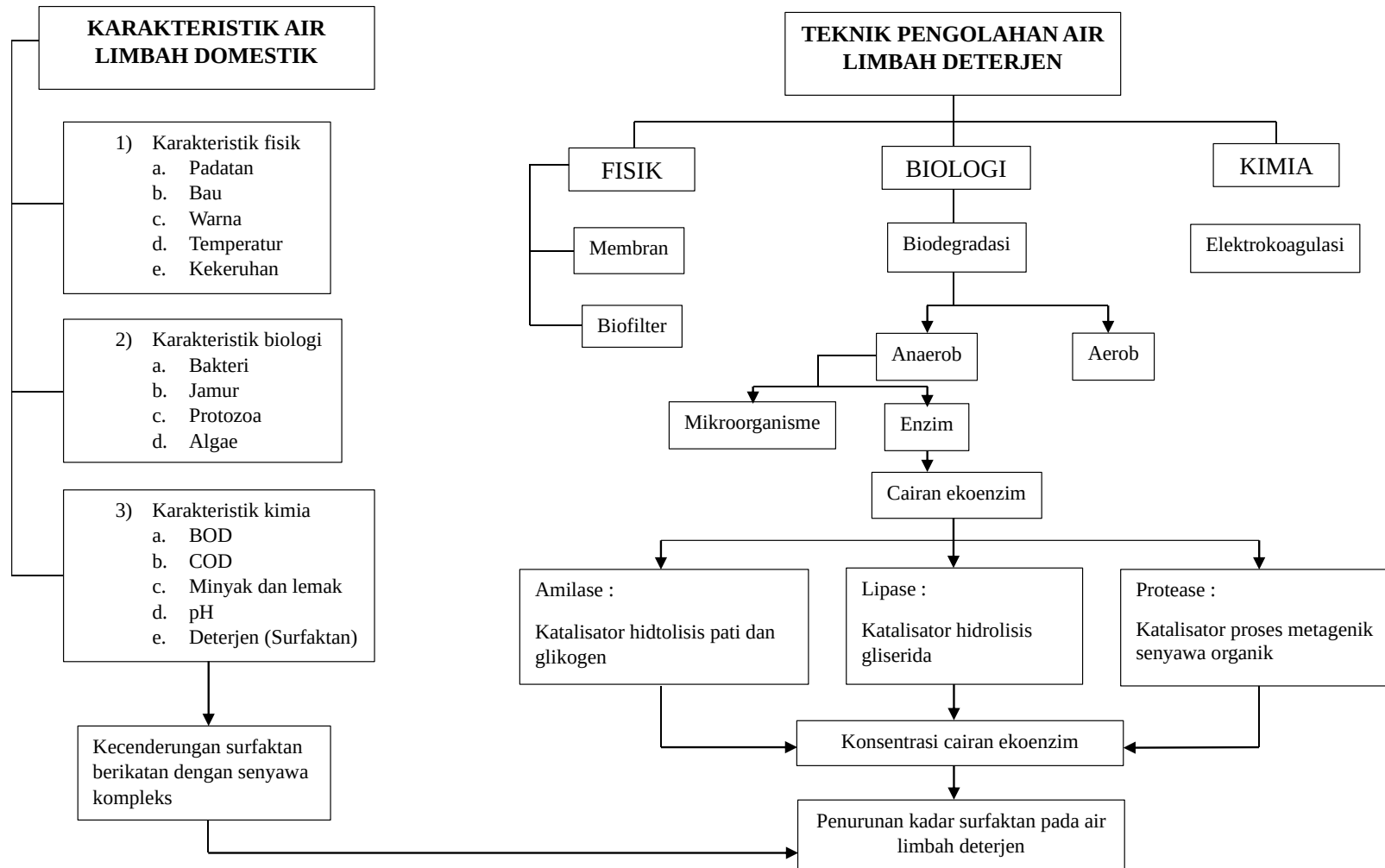
3. Kondisi Optimal Anaerobik

Kondisi optimal degradasi surfaktan secara anaerob oleh ekoenzim dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 4 Parameter Kondisi Optimal Proses Anaerobik

Parameter	Nilai Optimal	Keterangan
pH	6,8 – 7,2	Netral → stabil untuk fermentasi & metanogenesis
Suhu	30 – 37 °C	Suhu mesofilik, ideal untuk mikroba anaerob
Konsentrasi surfaktan	≤ 200 mg/L	Konsentrasi tinggi dapat bersifat toksik bagi mikroba anaerob dan mengakibatkan inhibisi metana

F. Kerangka Teori



Gambar 2.3 Kerangka Teori