

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Konsorsium bakteri merupakan gabungan dari beberapa jenis bakteri yang saling bekerja sama dalam mengolah limbah cair. Studi konsorsium/ gabungan bakteri telah menunjukkan bahwa dapat mengurangi jumlah polutan dalam air limbah, yaitu dapat dicapai kadar efisiensi penurunan TSS 58,44%; BOD 71,75%; COD 74,40%. Adapun penelitian lain tentang kemampuan konsorsium/ gabungan bakteri dalam menurunkan kadar pencemar air limbah cair yaitu mampu menurunkan kadar pencemar sebesar 73,33%; COD 69,61%; BOD 35,45%. Tabel 2.1 merangkum penelitian sebelumnya yang menunjukkan kemampuan konsorsium/ gabungan bakteri untuk mengurangi kadar pencemar air limbah.

**Tabel 2. 1** Ringkasan Penelitian Terdahulu

| No | Nama Peneliti (Tahun) | Tujuan   | Hasil   | Perbedaan  |
|----|-----------------------|--|---|--|
| 1  | (Ramadhan, 2015)      | Mengetahui pengaruh terhadap kandungan pH, TSS, COD, BOD, dan mencari kombinasi bakteri terbaik dalam menguraikan kandungan bahan pencemar pada limbah cair industri pembekuan ikan kaca | Pemberian kombinasi bakteri hingga hari ke 10 mampu menurunkan kadar TSS sebesar 47,6 mg/L, BOD sebesar 35,3 mg/L, COD sebesar 127,25 mg/L, | Jenis gabungan bakteri, jenis limbah, parameter pengujian. |

| No | Nama Peneliti (Tahun) | Tujuan  | Hasil   | Perbedaan   |
|----|-----------------------|---|---|---|
|    |                       | piring ( <i>Sillago sihama</i> )  |   |   |
| 2  | (Astuti, 2016)        | Untuk mengetahui aktivitas bakteri <i>Pseudomonas aeruginosa</i> dalam mereduksi polutan limbah cair di laboratorium kimia analitik UIN Alauddin Makassar   | Bakteri <i>Pseudomonas aeruginosa</i> mampu menurunkan kadar COD sebesar 93,5% dan kadar BOD sebesar 93,3%.   | Jenis limbah, parameter pengujian, bakteri untuk pengaplikasian |
| 3  | (Fauziah, 2016)       | Untuk menentukan masa inkubasi optimum <i>Klebsiella sp.</i> Dalam mendegradasi fenol, mengetahui karakteristik limbah sebelum dan setelah pemberian bakteri <i>Klebsiella sp.</i> , Mengetahui kemampaan <i>Klebsiella sp.</i> pada degradasi fenol dalam air limbah laboratorium. | Waktu inkubasi optimal bakteri <i>Klebsiella sp.</i> Yaitu 60 jam dengan laju degradasi 5,52 mg/L.jam; mengalami perubahan pada karakteristik limbah dimana konsentrasi fenol, BOD dan COD menurun, sedangkan nilai | Jenis limbah, bakteri untuk pengaplikasian                      |

| No | Nama Peneliti (Tahun) | Tujuan   | Hasil   | Perbedaan   |
|----|-----------------------|--|---|---|
|    |                       |  | pH dan TSS meningkat  |   |
| 4  | (Turista, 2017)       | Mengetahui kemampuan isolat bakteri <i>E. georgoviae</i> , <i>V. parahaemolyticus</i> , <i>p. stutzeri</i> dan komposisi konsorsiumnya untuk mendegradasi limbah organik pada Sungai Badeg | Kombinasi 3 isolat bakteri <i>Enterobacter gergovia</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> merupakan komposisi konsorsium dengan potensi penurunan terbesar. Kadar BOD (sebesar 71,75%), COD (74,40%), TSS (sebesar 71,75%), COD (74,40%), TSS (sebesar 58,44%), menaikkan DO (84,15%) pada biodegradasi secara <i>in vitro</i> . | Jenis gabungan bakteri, jenis limbah, parameter pengujian |

| No | Nama Peneliti (Tahun)            | Tujuan   | Hasil  | Perbedaan   |
|----|----------------------------------|--|--|---|
| 5  | (Fidiastuti <i>et al</i> , 2017) | Mengetahui potensi bakteri indigen untuk menguraikan limbah cair pabrik kulit secara <i>In Vitro</i> ( <i>Staphylococcus aerus</i> , <i>Pseudomonas pseudomallei</i> , dan <i>Actinobacillus sp.</i> ) | Berdasarkan efisiensinya konsorsium dari ketiga bakteri tersebut mampu menurunkan kadar TSS sebesar 73,33 %; BOD sebesar 35,45 %; COD sebesar 69,61% secara <i>in vitro</i> .  | Jenis limbah, bakteri untuk pengaplikasian, parameter pengujian           |
| 6  | (Anggraini <i>et al.</i> , 2019) | Untuk mengetahui penurunan kadar bahan organik pada air budidaya ikan lele menggunakan bakteri <i>Bacillus subtilis</i>  | Perlakuan terbaik dengan <i>Bacillus subtilis</i> dengan dosis 106 CFU/mL pada hari kelima, dengan penurunan kadar protein sebesar 13%; kadar karbohidrat 36%; kadar lemak 47% | Jenis air yang diamati, bakteri untuk pengaplikasian, parameter pengujian |
| 7  | (Banin <i>et al.</i> , 2021)     | Mengetahui kombinasi bakteri <i>Acinobacter baumannii</i>  | Konsorsium dari bakteri-bakteri tersebut mampu   | Jenis gabungan bakteri,   |

| No | Nama Peneliti (Tahun)         | Tujuan   | Hasil   | Perbedaan                         |
|----|-------------------------------|--|---|-----------------------------------|
|    |                               | <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Nitrococcus sp</i> , dan <i>Pseudomonas putida</i> dalam menurunkan kadar pencemar pada air limbah industri pembekuan ikan | memberikan pengaruh dalam mendegradasi limbah cair dengan terjadinya penurunan pada kadar TSS, COD, dan BOD. Konsorsium/ gabungan bakteri terbaik untuk menurunkan kadar pencemar yaitu bakteri <i>Acinobacter baumannii</i> dan <i>Pseudomonas putida</i> mampu menurunkan TSS sebesar 63,85 mg/L; COD 79,95 mg/L, dan BOD 20,05 mg/L. | jenis limbah, parameter pengujian |
| 8  | (Te Lin <i>et al.</i> , 2020) | Untuk memberikan informasi terkait penguraian polutan oleh konsorsium  | Konsorsium bakteri anaerobik mampu menyisihkan Cod  | Jenis gabungan bakteri, jenis     |

| No | Nama Peneliti (Tahun)               | Tujuan   | Hasil   | Perbedaan   |
|----|-------------------------------------|--|---|---|
|    |                                     | mikroba anaerobik dengan air limbah yang digunakan yaitu air limbah penyulingan wiski dengan parameter yang digunakan yaitu COD.   | sebesar 95,7% ± 1,3 %   | limbah, parameter pengujian                               |
| 9  | (Dissanaya ke <i>et al.</i> , 2021) | Untuk mengetahui kemungkinan penggunaan konsorsium bakteri mikroaerofilik dari sedimen danau tropis dalam percobaan penguraian penghilangan zat warna, penguraian kebutuhan oksigen kimia (COD), penguraian kebutuhan oksigen biokimia (BOD) dengan tingkat penguraian lebih dari 95% dalam waktu 50 jam | Konsorsium bakteri dari sedimen danau tropis mampu menguraikan seluruh senyawa pewarna azo MO dan CR dalam keadaan mikroaerofilik, serta mampu menguraikan secara penuh COD dan BOD | Jenis gabungan bakteri, jenis limbah, parameter pengujian |

| No | Nama Peneliti (Tahun)       | Tujuan  | Hasil   | Perbedaan   |
|----|-----------------------------|---|---|---|
| 10 | (Bidu <i>et al.</i> , 2023) | Mengetahui kemampuan konsorsium bakteri <i>Bacillus toyonensis</i> strain BCT-71120 dan <i>strenotrophomonas rhizophila</i> strain e-p10 dalam menurunkan nilai BOD, COD, TSS, dan perubahan nilai pH dalam penguraian secara anaerobik | konsorsium bakteri <i>Bacillus toyonensis</i> strain BCT-71120 dan <i>strenotrophomonas rhizophila</i> strain e-p10 mampu menurunkan kadar COD sebesar 86,94 %, BOD sebesar 80%, TSS 41,05%, pH berkisar antara 7,8-8,3 | Jenis gabungan bakteri, jenis limbah, parameter pengujian |

## 2.2 Teori-Teori yang Relevan

### 2.2.1 Air Limbah

Air limbah adalah hasil kegiatan aktivitas manusia baik industri maupun rumah tangga, yang merupakan air kotor dan mengandung zat yang dapat merugikan manusia dan makhluk hidup lainnya (Askari, 2015). Berdasarkan asalnya air limbah dapat diklasifikasikan menjadi :

#### 1. Air Limbah Industri

Air limbah industri adalah air limbah yang dihasilkan selama selama proses produksi beberapa industri. Limbah industri dapat berupa padat, gas atau partikulat. Air limbah dari kegiatan industri mengandung komponen

produksi, oleh karena itu harus diolah sebelum memasuki lingkungan (Widiyanto *et al.*, 2015).

## 2. Air Limbah Rumah Tangga

Air limbah rumah tangga/domestik adalah limbah yang dihasilkan oleh aktivitas domestik, yang berasal dari kamar mandi, dapur, air cucian bekas, dan lain-lain, yang mengandung mikroorganisme patogen. Volume pemakaian air penduduk setempat menjadi patokan untuk menentukan volume air limbah rumah tangga yang dihasilkan. Air limbah rumah tangga menjadi sumber utama pada pemukiman perkotaan (Askari, 2015). Karakteristik air limbah dapat digolongkan menjadi 3, diantaranya :

### 1. Karakteristik Fisik

Sifat fisik terdiri dari bau, warna dan padatan

### 2. Karakteristik Kimia

Sifat kimia terdiri dari pH, COD dan BOD. Sifat kimia ditandai dengan adanya campuran zat kimia anorganik yang dihasilkan dari penguraian urine, feses, dan limbahnya lainnya.

### 3. Karakteristik Biologis

Bakteri dapat berperan dalam mengevaluasi kualitas air. Hampir semua air limbah mengandung mikroorganisme dalam berbagai jenis dengan konsentrasi 10<sup>5</sup> sampai 10<sup>8</sup> organisme/mL.

(Apriyani, 2018)

## 2.2.2 Air Limbah Industri Obat Tradisional

Berdasarkan peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, air limbah industri obat tradisional adalah air hasil kegiatan usaha dan/ atau kegiatan yang memanfaatkan bahan atau campuran bahan alami sebagai obat tradisional. Adapun parameter baku mutu yang digunakan yaitu sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Baku Mutu Air Limbah Industri Obat Tradisional

| Parameter | Kadar Paling Tinggi (mg/L) | Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton bahan baku) |
|-----------|----------------------------|--|
| pH        | 6-9                        |  |
| BOD       | 75                         | 1,12   |
| COD       | 150                        | 2,25   |
| TSS       | 100                        | 1,5  |
| Fenol     | 0,2                        | 0,003  |

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014

#### 1. *Potential Hydrogen* (pH)

pH digunakan untuk menentukan tingkat keasaman atau basa pada suatu zat, larutan atau benda (Yogafanny, 2015). Pada baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah, pH pada air limbah industri obat tradisional yaitu berada pada kisaran 6-9 apabila pH yang diukur kurang dari 6 atau lebih dari 9, maka diperlukannya pengolahan agar air limbah tidak mencemari lingkungan.

#### 2. *Biological Oxygen Demand* (BOD)

BOD adalah jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan dan mengoksidasi bahan-bahan pencemar yang terdapat di dalam suatu perairan (Lolo *et al.*, 2020). Apabila konsumsi oksigen tinggi maka kandungan oksigen terlarut didalam air limbah kecil, hal ini disebabkan karena oksigen digunakan untuk menguraikan dan mengoksidasi bahan pencemar di dalam perairan. Sehingga nilai BOD digunakan untuk menunjukkan jumlah zat organik yang sesungguhnya (Hastutiningrum *et al.*, 2017).

#### 3. *Chemical Oxygen Demand* (COD)

COD adalah jumlah oksigen kimiawi yang diperlukan dalam air untuk mengoksidasi bahan pencemar zat organik menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O

secara kimiawi atau oksigen . COD merupakan analisis empiris yang digunakan untuk mengetahui kebenaran umum tentang terjadinya proses mikrobiologis di dalam air (Hastutiningrum *et al.*, 2017).

#### 4. *Total Suspended Solid (TSS)*

TSS adalah parameter kualitas air limbah yang menunjukkan terjadinya kekeruhan air yang disebabkan kandungan padatan tersuspensi didalam air. Padatan ini dapat langsung mengendap karena tidak larut dalam air. terdiri dari partikel yang lebih kecil dalam ukuran dan berat dari sedimen (Christiana *et al.*, 2020)

#### 5. Fenol

Fenol digunakan untuk membuat obat-obatan, herbisida dan banyak lagi. Fenol dalam air limbah merupakan senyawa beracun dan sumber pencemaran lingkungan. Fenol biasa disebut sebagai antiseptik komersial triklorofenol (TCP) (Aufa, 2017). Fenol berbentuk kristal ( $C_6H_6OH$ ) dengan bau khas, beracun dan korosif pada kulit (iritasi), larut dalam pelarut organik dan air terbatas yaitu 8,3 gram/ 100 mL. Terdapat banyak fenol di alam yang berasal dari bahan organik yang membusuk atau bahan alami (Fauziah, 2016). Fenol merusak kulit dan perut dan bersifat karsinogenik, mengendap dan merusak paru-paru khususnya. Sifat fenol yang beracun berbahaya dan berbahaya bagi kesehatan manusia bahkan dapat menyebabkan kematian jika zat tersebut masuk ke dalam tubuh manusia (Pane *et al.*, 2020)

### **2.2.3 Pengolahan Limbah Cair**

Pengolahan limbah cair bertujuan untuk menghilangkan dan/ atau mengurangi kontaminasi yang ada dalam air limbah, sehingga air limbah hasil olahan aman untuk dibuang ke lingkungan. Terdapat beberapa teknik yang dilakukan dalam pengolahan limbah, diantaranya : pengolahan secara fisika, pengolahan secara kimia, dan pengolahan secara biologis (Ramadhan, 2015). Pengolahan limbah cair menurut Indrayani (2018) dikelompokkan menjadi: pengolahan awal (*Pretreatment*) yang merupakan perlakuan tertentu sebelum masuk kedalam skema IPAL, yang menunjukkan pengolahan secara fisika;

pengolahan sekunder (*Secondary treatment*) merupakan proses pengolahan secara biologi dan kimia; dan pengolahan lanjutan (*Tertiary treatment*) dilakukan apabila limbah pada tahap akhir belum memenuhi baku mutu, dengan menunjuk pada kombinasi antara ketiganya atau penambahan proses.

Pengolahan limbah cair yang mengandung bahan organik dapat dilakukan secara aerob, anaerob, maupun campuran keduanya. Proses aerob adalah proses pengolahan limbah yang melibatkan oksigen. Sedangkan proses anaerob adalah proses pengolahan limbah yang tidak melibatkan oksigen (Maulana *et al.*, 2021).

#### **2.2.4 Bioremediasi**

Bioremediasi merupakan penguraian kontaminan lingkungan ke dalam bentuk yang kurang beracun menggunakan organisme hidup. Terjadinya bioremediasi karena enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme merubah polutan beracun menjadi struktur kimia yang tidak kompleks dan menjadi metabolit yang tidak beracun dan tidak berbahaya. Faktor-faktor yang mempengaruhi optimalisasi proses bioremediasi yaitu populasi mikroba penurun kadar polutan, faktor lingkungan (pH, suhu, oksigen, dan lainnya), keberadaan kontaminan terhadap populasi mikroba (Dewi, 2020).

Mikroorganisme yang berperan penting dalam bioremediasi limbah diantaranya yaitu khamir, bakteri, dan kapang. Bakteri memiliki keanekaragaman yang sangat tinggi secara fisiologi, morfologi, dan potensinya. Bakteri menggunakan bahan di habitatnya sebagai sumber nutrisi dengan cara metabolismenya, termasuk polutan yang mencemari lingkungan. Adapun tujuan dari bioremediasi yaitu ada dua, yang pertama menstimulasi pertumbuhan mikroba asli (indigen) atau tidak asli (mikroba sengaja dimasukkan ke area yang terkontaminasi). Kedua, menciptakan kondisi lingkungan yang sesuai dan meningkatkan intensitas kontak langsung antara mikroba dan senyawa pencemar agar terjadi degradasi. Tergantung pada jenis bioremediasi, itu terdiri dari :

- a. Berdasarkan lokasi
  - Bioremediasi in situ

Bioremediasi digunakan untuk menguraikan polutan langsung di tempat yang terkontaminasi.

- Bioremediasi ex situ

Bioremediasi melibatkan pengambilan limbah dan mengolahnya di tempat lain untuk didekomposisi, yang kemudian dikembalikan ke sumbernya, yang kemudian diolah dengan mikroba khusus.

b. Bioremediasi yang menggunakan mikroba

- Bioaugmentasi

Satu atau lebih mikroorganisme pendegradasi, baik alami atau ditingkatkan, untuk melengkapi populasi mikroba yang ada.

- Biostimulasi

Proses biostimulasi dilakukan dengan menambahkan nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme tertentu atau dengan merangsang kondisi lingkungan agar mikroorganisme dapat tumbuh dan berfungsi dengan baik.

- Bioremediasi intrinsik

Bioremediasi terjadi di air yang tercemar secara alami (Jekti, 2018).

### 2.2.5 Bakteri

Kelompok organisme mikroskopis yang pada umumnya tidak memiliki membran inti sel dan bersel tunggal disebut dengan bakteri. Bakteri pada umumnya tidak berklorofil dan memiliki dinding sel. Bakteri berperan penting di alam sehingga penting bagi kehidupan (Febriza *et al.*, 2021).

a. Ciri-ciri bakteri

a) Ukuran

Bakteri merupakan suatu organisme mikroskopis yang ukurannya sangat kecil. Bakteri memiliki ukuran yang sangat kecil dengan satuan mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Bakteri tidak dapat dilihat langsung menggunakan mata, sehingga digunakannya alat bantu yaitu mikroskop. Ukuran bakteri pada umumnya berkisar 0,5-5,0  $\mu\text{m}$  (Ramadan, 2017).

b) Bentuk

Keadaan lingkungan, medium, dan usia mempengaruhi bentuk tubuh morfologi bakteri. Pada umumnya bakteri yang lebih tua ukurannya akan lebih kecil dibanding bakteri yang usianya lebih muda. Bentuk bakteri terdiri dari 3, yaitu :

#### 1. Sferis (Kokus)

Kokus (*coccus*) merupakan bakteri dengan bentuk sferis atau bulat.

Bakteri bentuk kokus, terbagi atas :

- Monokokus, merupakan bakteri bulat tunggal
- Diplokokus, merupakan bakteri berbentuk bulat berjejer dua-dua
- Sarkina, merupakan bakteri bulat dalam kelompok empat-empat
- Streptokokus, merupakan bakteri bulat dalam kelompok dan memanjang berbentuk rantai
- Stafilokokus, merupakan bakteri dengan bentuk mirip sekumpulan anggur. Bakteri bulat yang menyatu menjadi kelompok sel tidak beraturan.

#### 2. Batang (Basil)

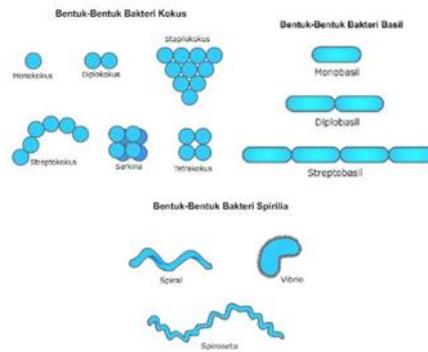
Basil adalah bakteri berbentuk batang atau silinder. Basil terdiri dari:

- Basil tunggal, bakteri berbentuk batang tunggal
- Diplobasil, bakteri berbentuk batang yang berangkai dua-dua
- Streptobasil, bakteri berupa basil yang berangkai membentuk rantai

#### 3. Spiral

Spiral merupakan bakteri yang berbentuk melilit, terbagi atas :

- Spiral, merupakan golongan bakteri berbentuk spiral
- Vibrio, adalah bakteri berbentuk koma yang dianggap seperti spiral yang tidak lengkap.
- Spirochaeta, adalah bakteri yang fleksibel dan berbentuk spiral dan tubuhnya dapat mengembang dan mengerut saat bergerak (Komalasari, 2020)



**Gambar 2.1** Bentuk bakteri

*Sumber: Komalasari, 2020*

b. Struktur bakteri

Komponen sel bakteri terdiri dari :

- a) Flagelum (*flagela*), embel-embel seperti rambut yang memanjang melalui dinding sel dan meninggalkan tubuh basal
- b) Pilus (*pili*) atau fimbria (*fimbriae*), terdapat pada dinding sel dengan struktur seperti flagella berupa bulu-bulu berdiameter lebih kecil, pendek dan kaku terdapat di sekitar dinding sel
- c) Kapsul, berupa lapisan bahan kental yang meliputi dinding sel
- d) Dinding sel, memberikan bentuk pada sel dari struktur yang amat kaku
- e) Membran plasma, terletak di bawah dinding sel berupa membran tipis
- f) Mesosom, membran plasma yang melipat dengan arah tujuan ke arah dalam sitoplasma
- g) Sitoplasma, cairan koloid yang mengandung molekul organik (lemak, protein, karbohidrat, enzim DA, garam mineral, ribosom, dan kloroform)
- h) Ribosom, terkemas padat di seluruh daerah sitoplasma berupa partikel-partikel RNA-protein
- i) DNA, terdapat 2 macam DNA pada bakteri yaitu yang pertama DNA (deoxyribonucleic acid) adalah DNA kromosom yang menentukan sebagian besar karakteristik metabolisme bakteri, DNA non-kromosom lainnya (plasmid) menentukan karakteristik tertentu seperti patogenesis, kesuburan dan resistensi antibiotik.

- j) Vakuola gas dan granula, untuk menyimpan cadangan makanan atau senyawa lain yang dihasilkan
  - k) Klorosom, berisi klorofil dan pigmen fotosintetik yang berupa struktur lipatan dibawah membran plasma (Boleng, 2015)
- c. Fase pertumbuhan bakteri
- Terdapat 4 fase pertumbuhan bakteri, diantaranya :
- a) Fase Adaptasi (Fase Lag)

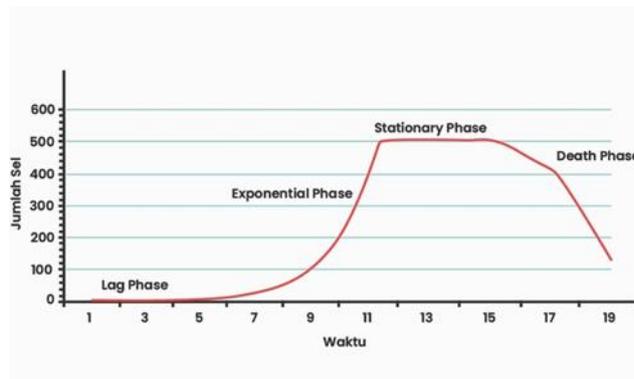
Tahap kemampuan bakteri beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang baru. Kemampuan beradaptasi bakteri sangat bervariasi selama fase akhir. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi pH, suhu, komposisi medium, jumlah sel pada inokulasi awal, dan karakteristik mikroba pada medium sebelumnya. Fase akhir biasanya berlangsung dari beberapa jam. Jenis substrat yang menyebabkan fase lag dan ukuran inokulasi awal dapat dikontrol sampai batas tertentu.
  - b) Fase Eksponensial

Fase pertumbuhan kedua, fase eksponensial, dibuktikan dengan pertumbuhan bakteri yang sangat cepat. Kondisi yang dapat mempengaruhi pertumbuhan bakteri diantaranya suhu, pH, sifat genetik mikroba, dan nutrient dalam media. Fase ini disebut juga dengan waktu generasi yang diperlukan oleh bakteri untuk melakukan pembelahan sel dan penggandaan.
  - c) Fase Stationer

Ketika laju pertumbuhan sama dengan laju pertumbuhan kematian mikroba, yang menyebabkan jumlah total mikroba dipertahankan, maka disebut fase stasioner. Awal fase stasioner ditandai dengan tumbuhnya bakteri yang mencapai titik dimana laju pertumbuhan melambat.
  - d) Fase Kematian

Fase dimana kematian lebih besar dari pertumbuhan total disebut fase kematian.

(Risna *et al.*, 2022)



**Gambar 2.2** Fase Pertumbuhan Bakteri

Sumber: Risna et al., 2022

d. Cara hidup bakteri

Berdasarkan cara hidup bakteri dibedakan menjadi beberapa bagian. Berdasarkan perolehan nutrisinya, bakteri dibedakan menjadi bakteri autotrof dan heterotrof. Kebutuhan oksigen bakteri terbagi menjadi tiga yaitu bakteri aerob, bakteri anaerob fakultatif dan bakteri anaerob obligat.

a) Bakteri *Autotrof* dan Bakteri *Heterotrof*

- Bakteri *Autotrof*

Bakteri yang dapat membuat makanannya sendiri dari senyawa anorganik adalah bakteri autotrof. Bakteri *autotrof* dibagi menjadi dua kelompok:

- Bakteri *fotoautotrof*

Bakteri yang menggunakan sumber energi cahaya untuk membentuk bahan organik adalah bakteri autotrof. Bakteri ini memiliki pigmen fotosintesis. Misalnya bakteri *Rhodospseudomonas*, *Thicysti*, *Thiospirillum* dan *Chlorobium*.

- Bakteri *kemoautotrof*

Bakteri *Kemoautotrof* adalah yang mengekstraksi energi sebagai hasil dari reaksi kimia. Reaksi kimia yang terlibat mirip dengan amonia (NH<sub>3</sub>), nitrit (HNO<sub>2</sub>), belerang (S), dan besi (Fe). Contohnya termasuk bakteri *Nitrosomonas*, *Nitrococcus*, *Thiobacillus ferroxidans*, *Nitrobacter*, *Methanomonas*, dan *Hydrogenomonas*.

- Bakteri *Heterotrof*

Bakteri yang tidak dapat menyusun makanan sendiri disebut dengan bakteri *heterotrof*. Kebutuhan makanan bakteri heterotofik diperoleh dari senyawa organik dari senyawa lain. Adapun bagian dari bakteri *heterotrof*, yaitu :

- Bakteri *saprofit*

Bakteri saprofit atau pengurai adalah bakteri yang memperoleh makanan dengan cara membusuk organisme mati atau bahan organik lainnya. Dalam bakteri saprofit ini berguna sebagai pengurai (dekomposer), dapat menguraikan bangkai, tumbuhan yang mati, atau sampah.

- Bakteri Parasit

Bakteri yang memakan tubuh inang lainnya disebut bakteri parasit (*Corynebacterium diphtheria*, *Fransciella tularensis*, *Bordetella Pertussis*, dan *Mycobacterium tuberculosis*) (Ramadan, 2017).

b) Bakteri aerob dan anaerob

Bakteri memecahkan makanan untuk menghasilkan energi diperoleh melalui proses pernapasan. Dalam membutuhkan oksigen bakteri dibagi menjadi dua bagian yaitu bakteri aerob dan bakteri anaerob.

- Bakteri aerob

Adalah bakteri yang membutuhkan oksigen untuk hidup (*Nitrosomonas*, *Nitrococcus*, *Acetobacter*, dan *Nocardia asteroides*).

- Bakteri anaerob

Bakteri yang tumbuh dalam lebih sedikit atau nol oksigen ( $O_2$ ) merupakan pengertian dari bakteri anaerob. Alasan mengapa bakteri anaerob mati atau memperlambat pertumbuhannya adalah adanya oksigen, yang membentuk hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), yang beracun bagi bakteri. Ada dua jenis bakteri anaerob yaitu anaerob obligat yaitu bakteri yang tidak dapat tumbuh sama sekali dengan adanya

oksigen dan yang kedua bakteri anaerob non obligat masih dapat hidup dalam kondisi oksigen rendah (Kesumah, 2020).

#### 2.2.6 Konsorsium Bakteri

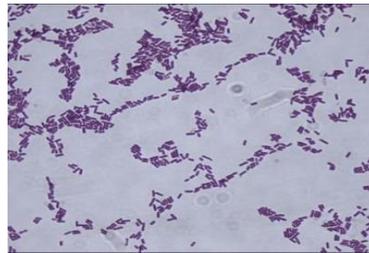
Bakteri merupakan mikroorganisme pengurai yang berperan penting dalam ekosistem. Dalam pertumbuhannya bakteri mensintesa enzim sehingga mampu beradaptasi terhadap lingkungan. Sekresi ekoenzim bakteri dapat memecah molekul kompleks menjadi lebih sederhana. Konsorsium bakteri merupakan gabungan beberapa bakteri yang saling melengkapi dalam menurunkan beban kadar pencemar. Biasanya proses degradasi di lingkungan dilakukan oleh konsorsium mikroba gabungan bukan tunggal (Turista, 2017).

##### a. *Bacillus subtilis*

*Bacillus subtilis* merupakan bakteri bersifat fakultatif anaerob karena dapat hidup dalam kondisi dengan adanya oksigen atau tidak ada oksigen. *Bacillus subtilis* telah digunakan secara industri untuk menghasilkan amilase, protease, antibiotik dan bahan kimia. Bakteri ini ikut serta dalam siklus makanan karena mampu menghasilkan berbagai enzim. *Bacillus subtilis* merupakan bakteri saprofit dan bakteri tanah yang memiliki jenis bakteri gram positif berupa bacilli (tangkai) dan lurus yang dapat membentuk endospora dengan bentuk sentral bulat, tepi tidak beraturan, permukaan tampak mengkilat, kecoklatan panjang 2-3  $\mu\text{m}$  dan lebar 0,7-0,8  $\mu\text{m}$ . Selain asam organik, secara spesifik bakteri *Bacillus subtilis* memiliki kemampuan degradasi bahan organik. Bakteri *Bacillus subtilis* dapat hidup pada pH 5-9 dengan suhu 37<sup>0</sup>C (Komalasari, 2020). Bakteri *Bacillus subtilis* merupakan bakteri saprofit, heterotrofik dan positif-katalase (Eni, 2022). Bakteri *Bacillus Subtilis* berperan dalam menguraikan karbohidrat dengan menghasilkan enzim amilase (Waluyo, 2018). Berikut adalah Klasifikasi bakteri *Bacillus subtilis* :

Kingdom : *Bacteria*  
Filum : *Firmicutes*  
Kelas : *Bacili*

Ordo : *Bacillales*  
Famili : *Bacillaceae*  
Genus : *Bacillus*  
Spesies : *Bacillus sp.*



**Gambar 2.3** Bakteri *Bacillus subtilis*

*Sumber: Husein, 2019*

b. *Pseudomonas Aeruginosa*

Gram negatif, berbentuk batang (basil) dan terlihat tunggal, berpasangan dan terkadang dalam rantai pendek, lebar 0,5-0,8 mikron panjang 1,5-3,0 mikron, bergerak aktif dengan filamen polar tunggal, tidak membentuk spora, dapat tumbuh pada suhu 37<sup>0</sup>C-42<sup>0</sup>C dan dibiakkan pada media *blood agar* akan menunjukkan hemolisis beta, dan bersifat oksidase positif yang disebut dengan bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. Sifat dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* yaitu aerobik dan fakultatif anaerobik dikarenakan dapat menggunakan arginin dan nitrat (NO<sub>3</sub>) sebagai penerima elektron pernafasan. *Pseudomonas aeruginosa* termasuk bakteri yang dapat hidup di berbagai lingkungan, karena bakteri ini mampu menggunakan substrat yang tidak biasa seperti sabun, obat-obatan, lemak bahkan golongan surfaktan. Berdasarkan derajat keasaman, *Pseudomonas aeruginosa* dapat tumbuh pada pH 5,5-9,0. *Pseudomonas aeruginosa* ditemukan di tanah, air, tumbuhan, dan hewan (Rofiani, 2020). *Pseudomonas aeruginosa* merupakan bakteri heterotrof saprofit, dimana bakteri ini merupakan bakteri yang memperoleh makanannya dengan cara menguraikan organisme yang mati atau bahan organik lainnya (Umar, 2015). Bakteri *Pseudomonas Aeruginosa* mampu tumbuh pada berbagai substrat. *Pseudomonas aeruginosa* menggunakan glukosa, laktosa, dan

asetat. Menghasilkan enzim pengurai pati seperti  $\alpha$ -amilase eksomaltopentahidrolase dan iso-amilase. Enzim ini mengkatalis pemutusan ikatan glikosida  $\alpha$ -1,3;  $\alpha$ -1,4; dan  $\alpha$ -1,6 pada pati. Hasil penguraian pati berupa gula sederhana seperti glukosa, oligosakarida dan maltosa (Waluyo, 2018). Berikut adalah klasifikasi bakteri *Pseudomonas aeruginosa* :

Kingdom : *Bacteria*  
Phylum : *Proteobacteria*  
Kelas : *Gamma Proteobacteria*  
Marga : *Pseudomonasdale*  
Suku : *Pseudomondaceae*  
Genus : *Pseudomonas*  
Species : *Pseudomonas aeruginosa*



**Gambar 2.4** Bakteri *Pseudomonas aeruginosa*

Sumber: Rofiani, 2020

c. *Klebsiella sp.*

*Klebsiella sp.* adalah bakteri gram negatif berbentuk batang (basil) pendek dengan kapsul polisakarida. *Klebsiella sp.* mereka tidak memiliki spora, tidak bergerak dan tidak memiliki flagela. Kapsul dari *Klebsiella sp.* terdiri dari O-antigen, yang merupakan polisakarida. Berdasarkan kebutuhan oksigen, *Klebsiella sp.* adalah bakteri anaerob fakultatif. *Klebsiella sp.* sering ditemukan di alam. Ini karena garis keturunan yang berbeda mengembangkan adaptasi spesifik terhadap lingkungan mereka menggunakan adaptasi kimiawi yang membuat mereka cocok dengan lingkungannya. *Klebsiella sp.* dapat tumbuh pada suhu 12<sup>0</sup>-43<sup>0</sup>C, suhu optimum 37<sup>0</sup>C dan pH 5-9. Bakteri *Klebsiella sp.* ditemukan di air, tanah,

tanaman, serangga dan hewan lainnya, termasuk manusia (Fauziah, 2016). Pada lingkungan hidup, air, tanah, makanan, sayur-sayuran, dan tumbuhan *Klebsiella sp.* merupakan bakteri saprofit (Sari *et al.*, 2019). *Klebsiella sp.* berperan untuk menguraikan karbohidrat. *Klebsiella sp.* dapat tumbuh pada berbagai substrat dan menggunakan sitrat dan glukosa sebagai sumber karbon. Glukosa dapat dipecah menjadi produk 2,3- butadienol, asam laktat, asam asetat, asam format. *Klebsiella sp.* juga mampu menghasilkan enzim pengurai pati yang tergolong enzim  $\alpha$ -1,6-glikanase. Enzim ini mampu memutus ikatan cabang  $\alpha$ -1,6 glikosida dan menghasilkan unit maltotriosa (Waluyo, 2018). Berikut adalah klasifikasi bakteri *Klebsiella sp.* :

Kingdom : *Bacteria*  
Phylum : *Proteobacteria*  
Class : *Gamma proteobacteria*  
Ordo : *Enterobacteriaceae*  
Genus : *Klebsiella*  
Spesies : *Klebsiella sp.*



**Gambar 2.5** Bakteri *Klebsiella sp.*

*Sumber: Fauziah, 2016*

### **2.2.7 Pewarnaan Gram**

Pewarnaan Gram Adalah salah satu teknik pewarnaan yang digunakan untuk mengklasifikasikan bakteri menjadi dua jenis, yaitu gram negatif dan gram positif. Tujuan dari kegiatan ini adalah memperjelas bentuk bakteri di bawah mikroskop. Kristal violet digunakan sebagai pewarna primer. Hasil pewarnaan diperkuat oleh iodin. Warna yang tidak berikatan dengan dinding sel akan dibersihkan oleh alkohol atau aseton. Warna yang tidak dapat diikat

oleh sel kemudian diberi pewarna lain, yaitu safranin. Berwarna ungu merupakan sel dengan Gram positif, sedangkan Gram Negatif akan berwarna merah muda (Murtius, 2018).

### **2.2.8 Peremajaan Bakteri**

Peremajaan bakteri dilakukan untuk menjaga ketersediaan nutrisi, untuk meregenerasi bakteri dan untuk mencegah agar sifat biakan bakteri murni tidak berubah (Rustanti *et al.*, 2016). Selain itu, peremajaan bakteri bertujuan untuk membuat bakteri melanjutkan metabolisme kembali setelah memproduksi (Wijayati *et al.*, 2014). Peremajaan bakteri juga dilakukan bertujuan agar bakteri induk yang masih dorman menjadi kultur segar sehingga bakteri tersebut segar untuk digunakan (Manalu *et al.*, 2017).

### **2.2.9 Kepadatan Bakteri**

Kepadatan bakteri dilihat dari nilai *Optical Density* (OD) yang diukur menggunakan spektrofotometer dan terlihat sebagai kekeruhan (Seniati *et al.*, 2019). Metode yang digunakan untuk mengukur jumlah bakteri dengan spektrofotometer adalah kekeruhan (*turbidity*), pengukuran dengan spektrofotometer adalah penghitungan bakteri secara tidak langsung. Hitungan bakteri tidak langsung adalah hitungan yang digunakan hanya untuk menentukan jumlah bakteri yang hidup. Menghitung transmitansi atau absorbansi sampel yang dinyatakan sebagai panjang gelombang adalah fungsi spektrofotometer. Uji antibakteri menggunakan metode kekeruhan, dimana kekeruhan bakteri dibandingkan dengan larutan standar (Rosmania *et al.*, 2020).

### **2.2.10 Pengolahan Limbah Cair dengan Proses Anaerobik**

Proses dimana senyawa organik dalam limbah diolah menjadi gas dan karbon dioksida tanpa oksigen disebut proses anaerobik. Proses anaerobik memecah senyawa organik dalam limbah, seperti karbohidrat, lemak dan protein, menjadi asam lemak, asam amino, dll melalui hidrolisis. Menghasilkan biogas yang mengandung metana (50-70%), CO<sub>2</sub> (25-45%)

dan sejumlah kecil nitrogen, hidrogen, dan hidrogen sulfida. Beberapa bakteri anaerob fakultatif berpartisipasi dalam dekomposisi (Widarti *et al.*, 2015) Penguraian anaerobik zat organik memiliki tahapan dalam proses penguraian yaitu sebagai berikut :

1. Proses Hidrolisis

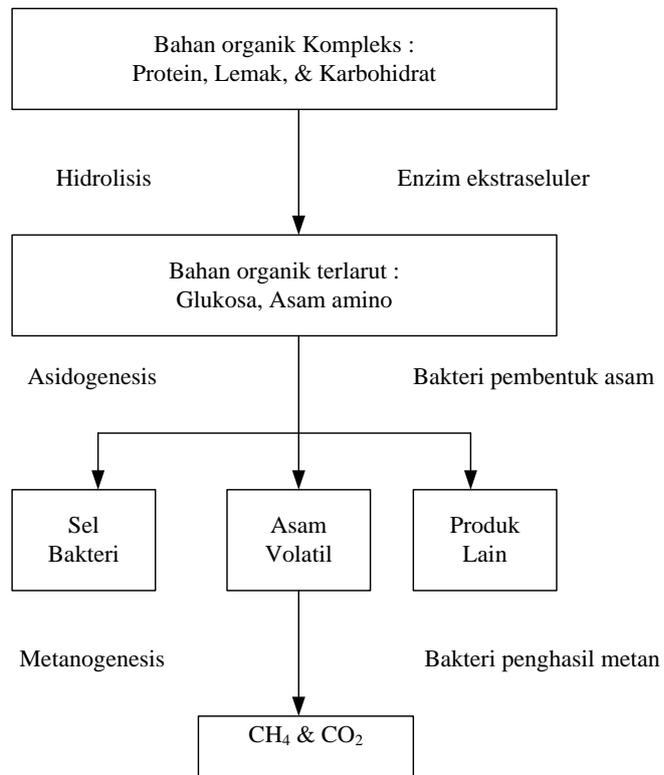
Dalam proses ini, bakteri saprofilik memecah bahan organik kompleks. Bahan organik yang tidak larut seperti polisakarida, lemak, protein, dan karbohidrat dikonsumsi oleh bakteri saprofilik, setelah itu enzim ekstraseluler mengubah bahan organik menjadi bahan organik yang larut dalam air..

2. Proses Asidogenesis

Bakteri asidogenik mengubah bahan organik terlarut menjadi asam organik rantai pendek seperti asam butirat, asam propionat, asam amino, asam asetat dan asam lainnya.

3. Proses Metanogenesis

Langkah ketiga adalah proses metanogenesis, dimana bakteri metanogenik mengubah asam organik yang mudah menguap menjadi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Dalam proses ini, bakteri metanogen mengubah asam organik yang mudah menguap menjadi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) (Amri *et al.*, 2015).



**Gambar 2.6** Alur Proses Anaerobik

*Sumber : Amri et al, 2015*