BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengolahan Air Limbah

Limbah yang akan dibuang ke lingkungan harus diolah terlebih dahulu agar tidak membahayakan lingkungan dan manusia. Teknologi pengolahan limbahnya pun harus disesuaikan dengan karakteristik air limbah yang akan diolah. Terdapat tiga metode yang dapat digunakan dalam mengolah air buangan, yakni sebagai berikut (Tchobanoglous, 1991);

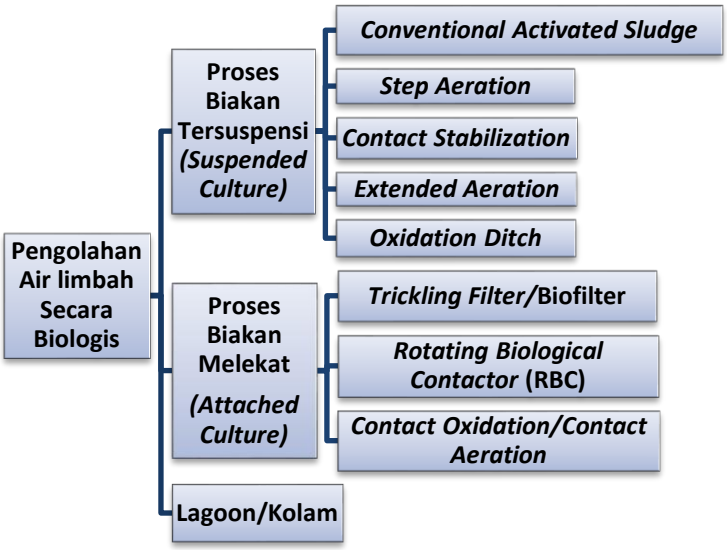
a. Pengolahan secara fisika
b. Pengolahan secara kimia
c. Pengolahan secara biologi

2.2 Pengolahan Biologi

Pada proses pengolahan air limbah khususnya air limbah yang mengandung senyawa organik, sebagian besar teknologi yang digunakan adalah dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan senyawa polutan tersebut. Proses pengolahan air limbah dengan menggunakan aktifitas mikroorganisme biasa disebut dengan "Proses Biologis" (Said, 2013).

Pengolahan air limbah secara biologis dikelompokkan menjadi tiga proses yakni proses biologis dengan biakan tersuspensi *(suspended culture)*, proses biologis dengan biakan melekat *(attached culture)*, dan proses pengolahan dengan sistem lagoon atau kolam.

Proses pengolahan air limbah secara biologis dapat dilakukan pada kondisi aerobik, kondisi anaerobik atau kombinasi antar keduanya. Proses biologis secara aerobik biasanya digunakan untuk pengolahan air limbah dengan beban organik yang tidak terlalu besar, sedangkan proses biologis secara anaerobik digunakan untuk pengolahan air limbah dengan beban organik yang sangat tinggi. Proses pengolahan air limbah biologis secara garis besar dapat dilihat pada **Gambar 2.1.**



Gambar 2.1 Pengolahan air limbah biologis secara aerobik (Said, 2013)

2.3 Biogranular

Biogranular atau lumpur granular dapat didefinisikan sebagai biomassa dengan beberapa sifat yang spesifik sehingga sangat cocok dalam pengolahan air limbah (Alpheenar, 1994). Biogranular terbentuk akibat *self-immobilization* suatu mikroorganisme yang melibatkan interaksi antar sel dengan sel lainnya secara biologis, fisika, dan kimia. Keuntungan biogranular dibandingkan dengan pengolahan lumpur aktif konvensional adalah memiliki bentuk yang beraturan, padat, struktur yang kuat, dan kemampuan pengendapan yang baik. Selain itu, biogranular memiliki kemampuan penyimpanan biomassa dan mampu bertahan pada air limbah yang mengandung polutan organik terlarut seperti organik, nitrogen, fosfor, dan zat-zat beracun (Liu, 2004). Proses pembentukan biogranular dapat dilakukan secara aerob dan anaerob. Selanjutnya akan dibahas lebih lanjut terkait pembentukan granular secara aerob.

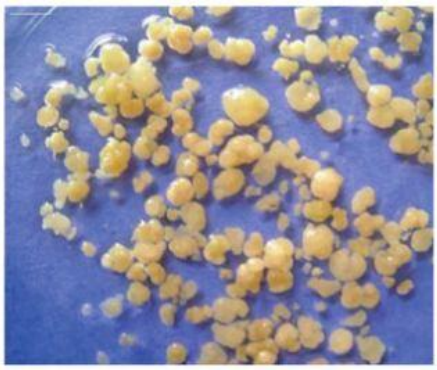
2.3.1 Granular Aerobik

Pada awalnya teknologi biogranular dikembangkan secara anaerobik, salah satu nya dengan menggunakan reaktor UASB yang terbukti sukses dalam

meremoval kontaminan *organic biodegradable* dari limbah kota dan limbah industri (Lettinga et al., 1980). Namun, saat ini telah berkembang teknologi biogranular yang dilakukan secara aerobik.

Aerobic Granular Sludge (AGS) dapat didefinisikan sebagai agregat tebal dan padat akibat *self-immobilization* mikroorganisme. Granulasi secara aerobik merupakan ide baru dalam bioteknologi lingkungan yang saat ini banyak dikembangkan pada *Sequencing Batch Reactor* (SBR) untuk mengolah limbah domestik dan limbah industri (Beun et al., 1999).

Granular aerobik memiliki beberapa karakteristik, diantaranya memiliki struktur yang kompak, bentuk yang teratur, halus dan bulat, kemampuan pengendapan yang baik, nilai *Sludge Volume Index* (SVI) yang rendah, dapat mengatasi beban organik yang tinggi dan memiliki waktu tinggal biomassa yang lama (Adav, 2008; Etterer dan Wilderer, 2001). Karena memiliki kemampuan pengendapan yang cepat, granular aerobik ini tidak memerlukan kebutuhan untuk lahan pengendapan yang luas sehingga lebih ekonomis dan berpotensi sebagai teknologi pengolahan air limbah secara biologis (Li et al., 2008). Bentuk dari granular aerobik dapat dilihat pada **Gambar 2.2** berikut;



Gambar 2.2 Granular Aerobik (Yang et al., 2008)

Pembentukan granular secara aerob dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya komposisi substrat, *Organic Loading Rate* (OLR), waktu pengendapan, *Hidraulic Retention Time* (HRT), kehadiran ion kalsium saat pembiakan, serta faktor-faktor lainnya (Liu, 2004).

a. Komposisi Substrat

Variasi substrat yang biasa digunakan dalam pembentukan granular aerobik meliputi glukosa, asetat, etanol, fenol, dan limbah cair sintetis (Beun et al., 1999; Tay et al., 2001, 2003). Penelitian yang telah dilakukan oleh (Pertiwi, 2014) dengan membandingkan substrat glukosa dengan asetat. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa dua jenis sumber karbon tersebut menunjukkan morfologi granular yang berbeda. Granular aerobik dengan substrat asetat memiliki bentuk struktur bakteri yang sangat kompak, tidak berfilamen dan permukaan yang lebih bersih dan bulat. Sedangkan substrat glukosa didominasi oleh bakteri berfilamen. Hal ini menunjukkan bahwa variasi substrat dapat mempengaruhi pembentukan struktur granular aerob.

b. *Organic Loading Rate* (OLR)

Granular aerobik dapat menampung beban OLR yang sangat besar yakni dari 2,5 sampai 15 kg COD/m^3/hari (Moy et al., 2002; Liu et al., 2003). Variasi terhadap OLR dalam pembentukan granular aerob tidak terlalu berpengaruh. Namun, karakter fisik granular aerobik tergantung pada OLR. Ukuran rata-rata granular aerobik meningkat dari 1,6 menjadi 1,9 mm dengan penambahan OLR dari 3 menjadi 9 kg COD/m^3/hari (Liu et al., 2003).

c. Waktu pengendapan *(settling time)*

Aerobik granul secara sukses dapat terpelihara dan menjadi dominan hanya pada operasi SBR dengan waktu pengendapan 5 menit (Qin et al, 2004). Produksi dari polisakarida dapat didorong dan permukaan sel hidrofobik secara signifikan dapat ditingkatkan pada waktu pengendapan yang singkat. Secara umum, aerobik granul yang telah matang dapat ditunjukkan pada waktu pengendapan kurang dari 1 menit, meninggalkan cairan supernatan dalam reaktor (Tay et al., 2001).

d. Kehadiran ion logam pada pembibitan

Logam bervalensi dua *(divalent metals)* sangat penting kehadirannya karena membawa perbedaan karakter fisik (ukuran partikel, kemampuan pengendapan, kemampuan penyaringan, dll) dan karakter kimia (EPS) pada lumpur granular (Sajjad, 2014). Bermacam penelitian tentang efek dari

divalent metals seperti Mg^{2+}, Ca^{2+}, dan Mn^{2+} telah dilakukan dalam peningkatan granulasi. Hal tersebut dilakukan oleh Li et al. (2008) pada studi yang telah dilakukan dengan menambahkan Mg^{2+} pada saat proses granulasi, tetapi efek yang ditimbulkan sedikit lebih lambat ketimbang penambahan Ca^{2+}.

e. Faktor-faktor lainnya

Gaya geser hidronamika menghasilkan laju alir udara didalam reaktor. Sehingga didapatkan kecepatan gas superfisial dibawah 1,2 cm/s dalam SBR yang berpengaruh terhadap terbentuknya granular aerob (Tay et al, 2001b). Selain itu, nilai F/M, HRT, temperatur, dan DO yang tepat dapat mempengaruhi kecepatan pembentukan serta ukuran granular.

2.3.2 Karakteristik Granular Aerobik

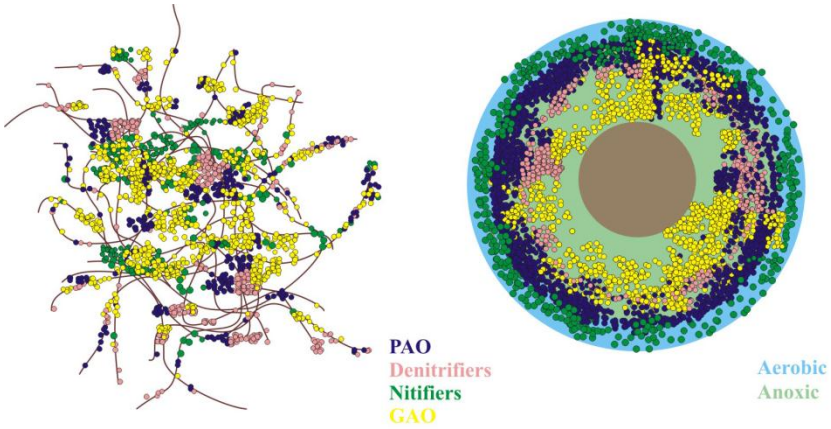
Karakteristik granular aerob dibagi menjadi dua, yaitu karakteristik fisik dan karakteristik kimia. Berikut penjelasan dari kedua karakteristik tersebut.

A. Karakteristik Fisik

Karakteristik fisik granular aerob yang biasanya menjadi parameter dalam penelitian adalah morfologi granular yang meliputi ukuran, struktur granular, aspek rasio serta kemampuan pengendapan yang meliputi kecepatan pengendapan, SVI, dan densitas.

1. Morfologi

Pemeriksaan mikroskop yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti menunjukkan bahwa morfologi dari lumpur granular aerob berbentuk bulat dan memiliki permukaan yang bersih (Peng et al. 1999 dan Tay et al 2001 a,c). Diameter granular sangat bervariasi antara 0,2 – 5 mm. Diameter tersebut lebih besar dibandingkan dengan flok lumpur aktif yakni 100 µm. Perbedaan antara granular aerob dengan flok lumpur aktif dapat dilihat pada **Gambar 2.3** berikut.



Gambar 2.3 Flok lumpur aktif (kiri) dan granular aerob (kanan) (Winkler, et al. 2012)

Ukuran kebulatan dari suatu bentuk granular dapat diketahui melalui pengukuran parameter aspek rasio. Nilai aspek rasio yang mendekati angka 1, bentuk granular aerob tersebut bulat. Sedangkan, jika mendekati angka 0, granular aerob tersebut cenderung berbentuk garis. Penelitian yang telah dilakukan Tay et al (2001) menunjukkan bahwa nilai aspek rasio granular aerob dengan glukosa sebagai substratnya adalah 0,79. Sedangkan granular aerob dengan substrat asetat adalah 0,73. Kebulatan bentuk granular tersebut lebih tinggi dibandingkan flok lumpur aktif.

2. Kemampuan Pengendapan

   Hal yang perlu diperhatikan dalam sistem pengolahan air limbah adalah kemampuan pengendapan. Kemampuan pengendapan merupakan hal yang penting dalam menentukan efisiensi pemisahan padatan-cairan didalam sebuah reaktor. Parameter yang diuji untuk mengetahui besarnya kemampuan pengendapan pada granular aerob adalah SVI dan kecepatan pengendapan. Qin et al. (2004) menyebutkan bahwa nilai SVI granular aerob yang baik yakni berada dibawah 50 ml/gr dan lebih rendah dari flok lumpur aktif. Sedangkan untuk kecepatan pengendapan granular berkisar 30 – 70 m/h. Kecepatan pengendapan tersebut lebih tinggi tiga kali lipat dibandingkan flok lumpur aktif yang hanya berkisar 8 – 10 m/h (Liu, 2004).

3. Densitas

   Berat jenis (*specific gravity*) dari granular aerob berkisar dari 1,004 hingga 1,065 (Etterer dan Wilderer, 2001). Hal ini dapat meningkatkan waktu retensi biomassa granular aerob dan mempermudah proses pemisahan antara padatan dan cairan dalam reaktor.

B. Karakteristik Kimia

Karakteristik kimia granular aerob yakni *Extracellular Polymeric Substances* (EPS). EPS merupakan sebuah proses biologi yang berpartisipasi dalam proses pengumpulan bakteri-bakteri dan membantu dalam melekatkan bakteri satu dengan yang lain sehingga membentuk granular. EPS terdiri dari protein dan polisakarida yang bertanggung jawab untuk mengembangkan sifat butiran granular aerob dengan mengubah karakteristik permukaan granular yang disebabkan adanya *active functional group* (FG) seperti hidroksil, karboksil, dan amida pada molekulnya (Sajjad, 2014)

2.4 Granular Aerobik dengan *Sequencing Batch Reactor* (SBR)

Sequencing Batch Reactor (SBR) merupakan variasi dari sistem pengolahan lumpur aktif dengan operasi isi (*fill*) dan tuang (*draw*). Sistem SBR sangat berguna untuk mengolah limbah perkotaan dan industri dengan kondisi aliran rendah atau intermiten (EPA, 1999). Sistem operasional SBR melalui beberapa fase yakni fase pengisian *(fill)*, reaksi *(react)*, pengendapan *(settle)*, pengeluaran (*decant),* dan *idle* (Irvine dan Ketchum, 1996). Tahapan sistem SBR dapat dilihat pada **Gambar 2.4.** Adapun penjelasan ke lima fase SBR sebagai berikut:

1. Fase pengisian *(fill)*

   Pada fase ini reaktor diisi dengan air limbah hingga mencapai volume yang ditetapkan. Waktu yang diperlukan sekitar 25% dari waktu pengendapan.

2. Fase reaksi *(react)*

   Proses biologi yang sudah dimulai sejak fase *fill* akan disempurnakan pada fase ini sampai proses biodegradasi BOD, COD dan nitrogen tercapai.

Didalam fase *react* ini dilakukan secara *batch* dengan dilakukan pengadukan/*mixing* dan aerasi untuk menyuplai oksigen yang cukup bagi mikroorganisme.

3. Fase pengendapan *(settle)*

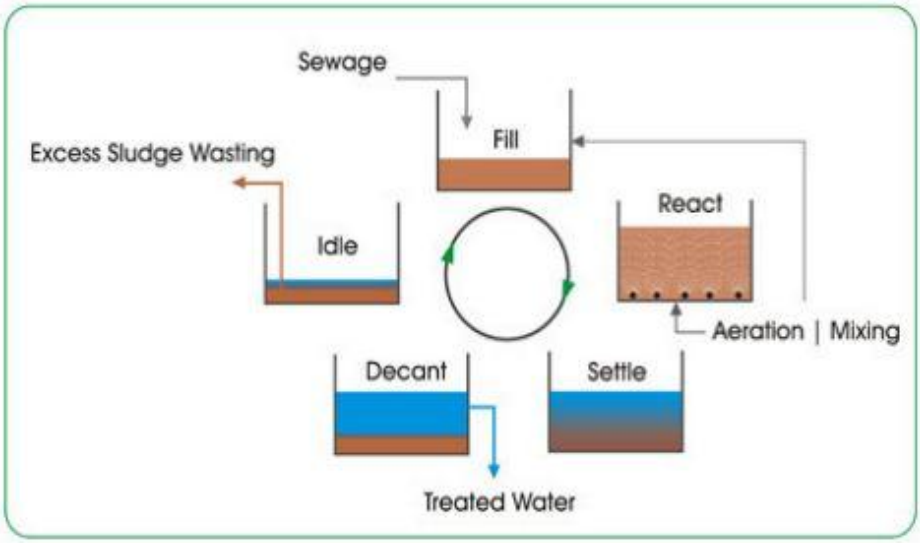
   Pada fase pengendapan, SBR juga berfungsi sebagai *clarifier.* Aerasi dihentikan untuk memberikan kesempatan pada biomassa untuk menghasilkan cairan supernatan yang terpisah dari lumpur. Waktu yang diperlukan untuk pengendapan berkisar antara 10-60 menit.

4. Fase pengeluaran (*decant)*

   Mengeluarkan cairan dari reaktor dengan menggunakan pipa atau *weir.* Pada fase ini effluen dikeluarkan dan hanya menyisakan lumpur biomassa. Waktu yang diperlukan sekitar 5-30% dari waktu pengendapan.

5. Fase diam *(idle)*

   Pada fase ini adalah menunggu untuk pengisian kembali. Fase ini kadang diperlukan untuk menstabilkan lumpur biomassa yang terjadi dalam proses kontak stabilisasi. Namun jika hanya digunakan 1 reaktor, proses ini biasanya sering dihilangkan.



Gambar 2.4 Tahapan Proses SBR (www.iaeme.com)

Faktor kunci keberhasilan granular dapat tumbuh dalam SBR adalah dengan pengaturan oksigen yang terbatas dan suhu yang rendah (de Kreuk et al., 2005). Penyisihan organik maupun pengendapan lumpur terjadi pada satu reaktor yang sama (*batch*). Kriteria biogranular yang terbentuk di dalam SBR adalah jika flok-flok yang terdapat dalam reaktor keluar. Untuk meningkatkan pertumbuhan biogranular, SBR harus dioperasikan dengan menetapkan waktu pengendapan dan waktu pengeluaran efluen yang rendah sehingga biomassa yang memiliki kecepatan pengendapan rendah akan keluar dari reaktor. Hal tersebut dikarenakan granular memiliki densitas yang lebih besar. Sehingga, granular memiliki kecepatan pengendapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan flok. Granular yang cepat mengendap akan tertahan di dalam reaktor.

2.5 Mekanisme Pembentukan Granular Aerobik

Bakteri yang berasal dari granular aerob membutuhkan beberapa kondisi yang perlu dipenuhi serta proses fisika, kimia, dan biologi untuk membentuk granular aerob. Liu dan Tay (2002) menyebutkan beberapa langkah proses pembentukan granular aerob. Adapun langkah-langkah tersebut sebagai berikut:

1. Terdapat kontak fisik antar bakteri, faktor-faktor yang mempengaruhi diantaranya gaya hidrodinamika, efek termodinamika, gravitasi, massa transfer dan mobilitas sel.
2. Stabilisasi kontak multisel yang dihasilkan dari bakteri yang saling tarik menarik. Kekuatan tarik menarik tersebut berasal dari gaya fisika (gaya Van der Waals, gaya tarik menarik dengan muatan yang berlawanan, hidrofobisitas, tegangan permukaan, dan bakteri berfilamen yang dapat menjembatani sel-sel), gaya kimia, dan gaya biokimia seperti dehidrasi permukaan sel dan pergerakan dari komunitas bakteri.
3. Pematangan agregat sel melalui produksi ektraseluler polimer (EPS), pertumbuhan sel, serta kondisi lingkungan sebagai fasilitas sel dapat berinteraksi dan menghasilkan struktur mikroba yang terorganisir.
4. Pembentukan agregat mikroba dengan struktur bakteri 3 dimensi dengan gaya geser hidrodinamika.