

**DINAMIKA POPULASI BAKTERI HETEROTROF DAN AUTOTROF
PADA PENGOLAHAN *SLUDGE PRODUCED WATER* HASIL EKSPLORASI
MINYAK DAN GAS BUMI DENGAN METODE *AERATED STATIC PILE*
DAN DEGRADASI ANAEROBIK**

***POPULATION DYNAMICS OF HETEROTROPHS AND AUTOTROPHS
BACTERIA ON SLUDGE PRODUCED WATER TREATMENT OF OIL AND
GAS EXPLORATION WITH AERATED STATIC PILE AND ANAEROBIC
DEGRADATION METHODS***

Eka Pravita Sari¹ dan Agus Jatnika Effendi²

Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

¹e_pravitasari@yahoo.com ²jatnika@indo.net.id

Abstrak: Kuantitas *produced water* akan semakin meningkat setiap tahun seiring dengan semakin lamanya sumur pengeboran. Hal ini akan berbanding lurus dengan *sludge* yang dihasilkan pada proses pengolahan *produced water* di IPAL. Tingginya rasio C/N serta kandungan C-organik pada *sludge* akan mempengaruhi proses degradasi *sludge* oleh mikroba. Pengolahan yang memanfaatkan kinerja dari mikroorganisme ini dilakukan secara aerob dan anaerob hingga kandungan C-organik >15% dan rasio C/N yaitu $15\% \leq C/N \leq 25$ yang mengacu dalam Permentan No.70/Permentan/SR.140/10/2011. Studi penelitian lebih banyak menargetkan hubungan dinamika populasi kedua kelompok mikroba tersebut terhadap performa kerja reaktor secara aerob dan anaerob. Hasil penelitian diperoleh bahwa pertumbuhan bakteri heterotrof dan autotrof terjadi secara berurutan. Populasi tertinggi bakteri heterotrof aerob mencapai $3,3.10^{10}$ - $4,9.10^{13}$ CFU/g tanah (hari ke-20), bakteri autotrof aerob mencapai $4,2.10^6$ - $8,3.10^8$ CFU/g tanah (hari ke-30), bakteri heterotrof anaerob mencapai $2,56.10^6$ - $1,56.10^8$ CFU/g tanah (hari ke-25), dan bakteri autotrof anaerob mencapai $5,6.10^3$ - $9,7.10^5$ CFU/g tanah (hari ke-40). Reaktor pengolahan paling optimum terdapat pada RA2 (untuk bakteri heterotrof aerob) dengan μ 0,807 koloni/hari, RA3 (bakteri autotrof aerob) dengan μ 0,468 koloni/hari, RN1 (untuk bakteri heterotrof anaerob) dengan μ 0,412 koloni/hari dan RN5 (untuk bakteri autotrof anaerob) dengan μ 0,197 koloni/hari.

Kata kunci: *sludge produced water*, bakteri heterotrof, bakteri autotrof, *aerated static pile*, degradasi anaerobik.

Abstract: The quantity of *produced water* will be increased every year along with the length of drilling wells. It will be directly proportional to generated *sludge* from *produced water* treatment process at waste water treatment plant. The high of C/N ratio and C-organic content on *sludge* will influence of degradation process by microbes. The process used of microbes performance in aerobic and anaerobic until C-organic content >15% and C/N ratio is $15\% \leq C/N \leq 25$ which refers in Permentan No.70/Permentan/SR.140/10/2011. Research study more targeted relations of population dynamics both two groups microbes with reactor performance in aerobic and anaerobic. The results of study showed that bacterial population was increased by increasing source carbon. The growth of heterotrophs and autotrophs bacteria occur sequentially. Highest population of heterotrophs aerobic bacteria reached $3.3.10^{10}$ - $4.9.10^{13}$ CFU/g soil (20th day), population of autotrophs aerobic bacteria reached $4.2.10^6$ - $8.3.10^8$ CFU/g soil (20th day), population of heterotrophs anaerobic bacteria reached $2.56.10^6$ - $1.56.10^8$ CFU/g soil (25th day), and population of autotrophs anaerobic bacteria reached $5.6.10^3$ - $9.7.10^5$ CFU/g soil (40th day). Optimum reactors was found in RA2 (for heterotrophs aerobic bacteria) with μ is 0.807 colonies/day, RA3 (for autotrophs aerobic bacteria) with μ is 0.468 colonies/day, RN1 (for heterotrophs anaerobic bacteria) with μ is 0.412 colonies/day, and RN5 (for autotrophs anaerobic bacteria) with μ is 0.197 colonies/day.

Keywords: *sludge produced water*, heterotrophs bacteria, autotrophs bacteria, *aerated static pile*, anaerobic degradation.

PENDAHULUAN

Saat ini minyak bumi merupakan sumber utama energi dan penerimaan utama banyak negara dan produksinya telah digambarkan sebagai salah satu kegiatan industri yang paling penting dalam abad ke-21 (Igunnu dan Chen, 2012). Di Indonesia, energi migas memiliki peranan penting dalam upaya mendukung pembangunan nasional dan masih menjadi andalan utama perekonomian. Namun selain memberikan dampak positif bagi pertumbuhan ekonomi nasional juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satunya berupa limbah *produced water* yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi dan produksi dalam volume yang cukup besar (Igunnu dan Chen, 2012).

Rasio antara volume minyak dan *produced water* yang dihasilkan yaitu 1:3 (Igwe *et al.*, 2013). *Produced water* tersebut mengandung bahan organik dan anorganik seperti minyak terdispersi dan terlarut, *grease*, logam berat, radionuklida, sisa bahan kimia, *formation solids*, garam, wax dan mikroorganisme (Igunnu dan Chen, 2012). Produk sampingan dari pengolahan *produced water* ini berupa residu padatan yang disebut sebagai *sludge produced water*. Menurut Peraturan Pemerintah (PP) No.18/1999 jo PP 85/1999, *sludge produced water* dikategorikan sebagai limbah B3 dengan kode limbah D220 dan D221. *Sludge* dari proses lumpur aktif merupakan suatu masalah serius (Swapnil dan Rahul, 2012) karena membutuhkan biaya pengolahan yang tinggi dan berdampak terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Victoria, 2013), sehingga perlu dilakukan pengelolaan lebih lanjut sesuai regulasi tersebut.

Pengolahan terhadap *sludge* tergantung karakteristik *sludge* tersebut (Umesh *et al.*, 2013). Mengingat bahwa kandungan organik *sludge produced water* lebih dari 50%, sehingga pengolahan biologis bisa menjadi pilihan yang lebih efisien. Pengolahan secara biologis lebih murah, lebih ramah lingkungan serta menghasilkan limbah yang lebih sedikit dibandingkan pengolahan lain (Shah dan Patel, 2014). Pengolahan yang memanfaatkan kinerja dari mikroorganisme ini dapat dilakukan secara aerob dan anaerob. Proses pengolahan dilakukan hingga kandungan C-organik >15% dan rasio C/N yaitu $15\% \leq C/N \leq 25$ yang mengacu pada Permentan No.70/Permentan/SR.140/10/2011 apabila *sludge produced water* akan dimanfaatkan menjadi *fertilizer* atau pembenah tanah. Anand *et al* (2014) menyatakan bahwa rasio C/N merupakan indikator penting yang menentukan tingkat dekomposisi bahan organik oleh bakteri heterotrof. Tingginya rasio C/N pada suatu bahan menggambarkan belum terdekomposisi bahan organik tersebut dengan sempurna (Rodriguez dan Vazquez, 2013).

Optimalisasi degradasi materi organik merupakan hasil kerja berbagai bakteri secara konsorsium (Sarkar *et al.*, 2011). Hal ini karena setiap kelompok mikroba memiliki kemampuan untuk mengubah senyawa organik yang satu menjadi lainnya sebagai sumber energi dan nutrien (Chatterjee *et al.*, 2014). Dengan fokus pengolahan nilai C-organik dan rasio C/N maka dapat dilakukan studi mengenai dinamika populasi mikroba berdasarkan sumber karbonnya, yaitu kelompok bakteri heterotrof dan autotrof. Marsh *et al* (2000) menyatakan bahwa dinamika populasi perlu dipahami melalui analisis komunitas untuk mempelajari struktur dan fungsi suatu komunitas.

Penelitian yang dilakukan lebih banyak menargetkan hubungan dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof yang spesifik terhadap performa kerja reaktor baik secara aerob maupun anaerob. Identifikasi ekologi mikroba pada titik-titik isolasi dari sampel periodik dapat digunakan untuk mengamati aktivitas kedua kelompok bakteri tersebut. Dengan demikian, dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai dinamika populasi dan suksesi kelompok bakteri heterotrof dan autotrof yang terjadi pada proses pengolahan *sludge produced water* PT X secara aerob dan anaerob dan menentukan variasi reaktor yang memberikan laju pertumbuhan optimum bagi kedua kelompok bakteri tersebut.

METODOLOGI

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret 2014 sampai Agustus 2014. Sampel *sludge produced water* diperoleh dari IPAL PT X yang bergerak dalam bidang eksplorasi minyak dan gas bumi. Simulasi proses degradasi aerob dilaksanakan di Gedung PAU ITB, sedangkan proses anaerob di Laboratorium

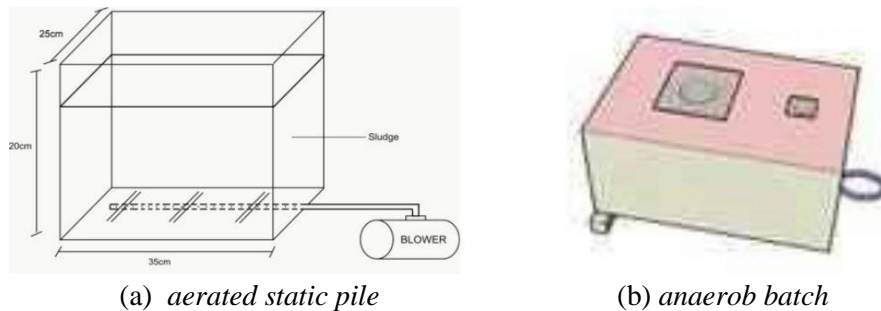
Kualitas Air TL ITB. Analisis sampel secara mikrobiologi dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi TL ITB.

Reaktor Pengolahan *Sludge Produced Water*

Simulasi proses degradasi *sludge produced water* secara aerob dan anaerob menggunakan dua jenis reaktor yang berbeda yaitu :

Reaktor aerob dengan sistem *aerated static pile* : Reaktor aerob pada penelitian ini memiliki dimensi panjang, lebar dan tinggi yaitu 35 cm x 25 cm x 20 cm dengan sistem pemberian udaranya dilakukan secara *active aeration* melalui *stockpile*.

Reaktor anaerob dengan sistem *batch anaerob* : Reaktor anaerob pada penelitian ini memiliki dimensi panjang, lebar dan tinggi yaitu 35 cm x 30 cm x 30 cm yang diisolasi dari udara luar dan bagian dasar dilengkapi dengan saluran lindi. Berikut **Gambar 1** konfigurasi masing-masing reaktor yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 1. Sistem reaktor pada penelitian.

Variasi Reaktor Pengolahan *Sludge Produced Water*

Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap *sludge* dan *bulking agent*. Berikut **Tabel 1** menampilkan masing-masing variasi yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Variasi reaktor pengolahan *sludge produced water*.

Kode reaktor		<i>Bulking agent : Sludge</i>	<i>Bulking agent</i>	<i>Sludge</i>
Aerob	Anaerob			
RA1	RN1	1:1	serbuk kayu	Biosludge
RA2	RN2	1:2	serbuk kayu	Biosludge
RA3	RN3	1:3	serbuk kayu	Biosludge
RA4	RN4	1:1	daun kering	Biosludge
RA5	RN5	1:2	daun kering	Biosludge
RA6	RN6	1:3	daun kering	Biosludge
RA7	RN7	Tidak ada	kontrol	Biosludge
RA8	RN8	1:1	serbuk kayu	
RA9	RN9	1:1	daun kering	<i>Sludge campuran</i>

Parameter Pengamatan

Parameter pengamatan meliputi monitoring harian dan sampling secara periodik. Monitoring harian dilakukan setiap hari selama proses pengolahan meliputi temperatur, pH, dan kelembaban. Sampling secara periodik dilakukan dengan mengambil sampel dari hasil Pengomposan untuk menghitung total populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada hari ke-0 (T0), ke-5 (T5), ke-10 (T10), ke-15 (T15), ke-20 (T20), ke-25 (T25), ke-30 (T30), ke-35 (T35), ke-40 (T40), ke-45 (T45) dan ke-50 (T50).

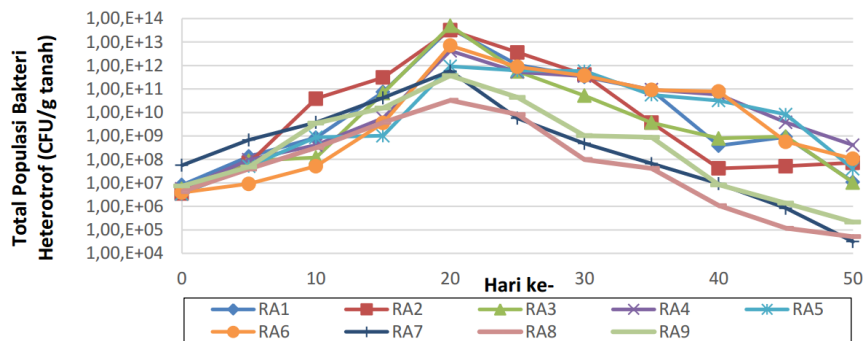
Cara Kerja

Penelitian dilakukan secara eksperimental dalam skala laboratorium. Untuk mengetahui dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada tiap proses degradasi *sludge* maka cara kerja penelitian ini terdiri dari empat tahapan utama yaitu tahap isolasi dan enumerasi, purifikasi, penentuan kinetika bakteri berdasarkan performa kinerja reaktor serta identifikasi bakteri. Penghitungan populasi bakteri heterotrof menggunakan media *nutrient agar* dengan sumber karbon berupa C-organik dan bakteri autotrof menggunakan media selektif *winogradsky* dengan sumber karbon berupa unsur N (Chatterjee *et al.*, 2014). Sampling aerob dilakukan dengan *purposive sampling*. Sampling anaerob dengan *grab sampling* dan dilakukan *flushing* gas nitrogen selama 3-5 menit kedalam reaktor setiap hari. Isolasi bakteri aerob menggunakan metode *spread plate* dan bakteri anaerob dengan metode *pour plate* yang masing-masing dilakukan secara duplo. Purifikasi isolat dilakukan pada 2-3 koloni bakteri berbeda yang secara visual terlihat paling banyak dan berasal dari *total plate count* yang valid. Identifikasi bakteri dilakukan menggunakan *kit Analytical Profile Index (API) 50CHB* untuk kelompok bakteri aerob dan *API 20A* untuk bakteri anaerob.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Total Populasi Bakteri Heterotrof Aerob

Bakteri heterotrof adalah kelompok bakteri yang menggunakan C-organik sebagai sumber karbon dan sumber energi pertumbuhannya (Chatterjee *et al.*, 2014). Berikut **Gambar 2** menyajikan total populasi bakteri heterotrof dari sembilan reaktor aerob pada penelitian ini.



Gambar 2. Hubungan total populasi bakteri heterotrof aerob terhadap waktu.

Berdasarkan **Gambar 2** diatas terlihat bahwa total populasi bakteri heterotrof dari sembilan reaktor aerob (RA1- RA9) memperlihatkan peningkatan populasi dari awal hingga hari ke-20 pengolahan. Kisaran populasi pada awal pengolahan yaitu $3,4 \cdot 10^6$ - $5,7 \cdot 10^7$ CFU/g tanah dan pada hari ke-20 mencapai $3,3 \cdot 10^{10}$ - $4,9 \cdot 10^{13}$ CFU/g tanah. Pada akhir pengolahan terjadi penurunan dengan populasi akhir berkisar antara $3,2 \cdot 10^4$ - $4,1 \cdot 10^8$ CFU/g tanah.

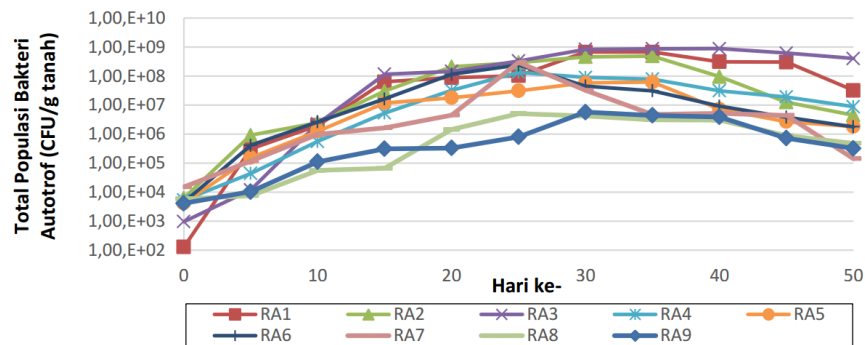
Peningkatan populasi bakteri heterotrof yang terjadi pada awal pengolahan karena kelompok bakteri ini mampu memanfaatkan senyawa organik yang terkandung di dalam *sludge* sebagai sumber karbon pertumbuhannya. Sebagian besar senyawa organik tersebut digunakan sebagai sumber energi dan dibakar pada proses respirasi menjadi CO_2 sementara sebagian besar lainnya bersama unsur nitrogen akan difungsikan sebagai salah satu unsur dalam pembentukan sel protoplasma terutama pembentukan dinding sel (Prabandari, 2005). Penurunan yang terjadi setelah hari ke-20 pengolahan karena bahan organik yang terkandung di dalam *sludge* telah berkurang secara berlahan seiring dengan meningkatnya jumlah populasi. Bahan organik berbanding lurus dengan kepadatan mikroba (Chatterjee *et al.*, 2014). Pada akhir proses jumlah populasi heterotrof yang mati lebih banyak daripada jumlah yang tumbuh. Fase ini merupakan fase endogenous bakteri dimana laju kematian lebih besar daripada laju pertumbuhan.

Berdasarkan variasi *bulking agent* serbuk kayu, populasi tertinggi terdapat pada reaktor RA3 yaitu $4,9 \cdot 10^{13}$ CFU/g tanah. Untuk *bulking agent* daun kering, populasi tertinggi terdapat pada reaktor RA6 yaitu $7,1 \cdot 10^{12}$ CFU/g tanah. Jumlah populasi yang diperoleh dengan penambahan kedua *bulking agent* ini lebih besar daripada reaktor kontrol yang memiliki populasi sekitar $5,8 \cdot 10^{11}$ CFU/g tanah. Tingginya populasi bakteri pada penambahan serbuk kayu karena serbuk kayu memiliki tekstur yang lebih lepas sehingga menghasilkan tingkat homogenitas lebih besar, meningkatkan porositas dan *hydraulic conductivity* pada *sludge*. *Hydraulic conductivity* mengendalikan distribusi akseptor elektron dan nutrisi pada subsurface (Sonawdekar, 2012). Dengan demikian meningkatkan kerja bakteri aerob dalam mendegradasi *sludge*.

Total Populasi Bakteri Autotrof Aerob

Bakteri autotrof adalah kelompok bakteri yang menggunakan CO_2 sebagai sumber karbon dan bahan anorganik sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya. Berikut **Gambar 3** menyajikan total populasi bakteri autotrof dari sembilan variasi reaktor aerob pada penelitian ini.

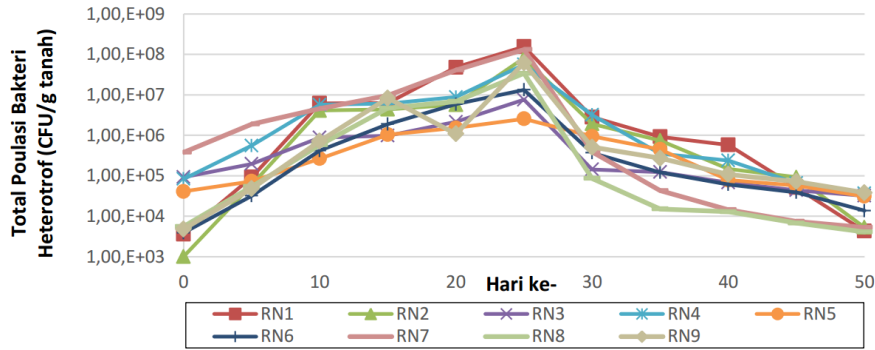
Berdasarkan **Gambar 3** diatas terlihat bahwa total populasi bakteri autotrof dari sembilan reaktor aerob (RA1- RA9) mengalami peningkatan mulai hari ke-0 hingga hari ke-30 pengolahan. Selanjutnya populasi cenderung stabil dan jumlahnya tidak jauh berbeda hingga akhir pengolahan. Kisaran populasi pada awal pengolahan yaitu $1,28 \cdot 10^2$ - $1,52 \cdot 10^4$ CFU/g tanah dan pada hari ke-30 populasi mencapai $4,2 \cdot 10^6$ - $8,3 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Sementara pada akhir pengolahan populasi berada pada kisaran $1,42 \cdot 10^5$ - $4,0 \cdot 10^8$ CFU/g tanah.



Gambar 3. Hubungan total populasi bakteri autotrof aerob terhadap waktu

Peningkatan populasi bakteri autotrof terjadi seiring dengan tingginya aktivitas metabolisme yang dilakukan oleh bakteri heterotrof. Bakteri heterotrof akan menghasilkan CO_2 yang dapat dimanfaatkan oleh autotrof sebagai sumber karbon berikutnya. Ketersediaan senyawa anorganik seperti amonia digunakan bakteri autotrof sebagai sumber energi untuk metabolisme dan sumber nitrogen untuk pembentukan sel (Chatterjee *et al.*, 2014), sehingga jumlahnya semakin hari semakin meningkat dan puncak populasinya terjadi di hari ke-30 pengolahan. Selanjutnya jumlah populasi bakteri autotrof cenderung stabil hingga akhir pengolahan. Bakteri autotrof menggunakan CO_2 sebagai satu-satunya sumber karbon dan keberadaannya dihubungkan dengan tersedianya unsur-unsur anorganik yang melangsungkan oksidasi untuk menghasilkan energi (Sutedjo *et al.*, 1991).

Berdasarkan **Gambar 4** diatas terlihat bahwa total populasi bakteri heterotrof dari sembilan reaktor anaerob (RN1 - RN9) mengalami peningkatan hingga hari ke-25 pengolahan kemudian terjadi penurunan seiring dengan waktu pengolahan. Kisaran populasi bakteri heterotrof anaerob pada awal pengolahan yaitu $1,01 \cdot 10^3$ - $3,8 \cdot 10^8$ CFU/g tanah dan pada hari ke-25 pengolahan merupakan pertumbuhan tertinggi bakteri heterotrof anaerob dengan kisaran mencapai $2,56 \cdot 10^6$ - $1,56 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Pada akhir pengolahan populasi bakteri heterotrof berada pada kisaran $4,1 \cdot 10^3$ - hingga $3,8 \cdot 10^4$ CFU/g tanah.



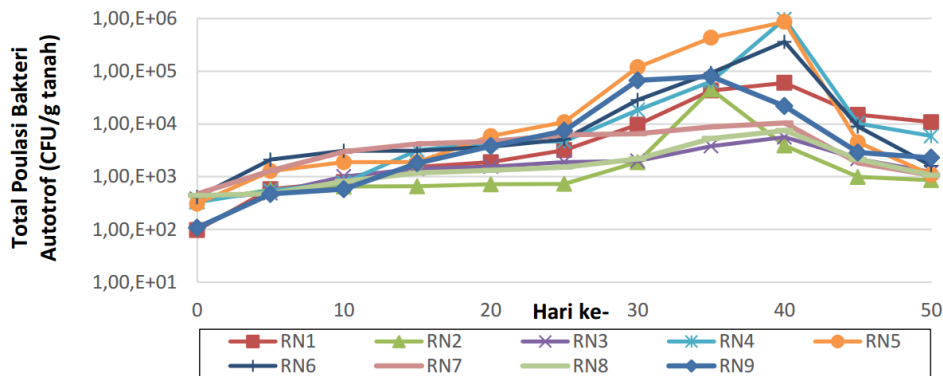
Gambar 4. Hubungan total populasi bakteri heterotrof anaerob terhadap waktu.

Peningkatan populasi yang terjadi pada awal pengolahan diduga karena bakteri telah mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan tanpa oksigen (anaerob) dan mampu memanfaatkan ketersediaan senyawa organik yang tinggi pada *sludge*. Senyawa organik digunakan sebagai sumber energi untuk pembentukan sel-sel baru dan untuk reproduksi yang menyebabkan pertambahan populasi (Parwanayoni, 2008). Penurunan jumlah populasi heterotrof pada akhir pengolahan karena jumlah substrat organik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon dan energi terus mengalami penurunan, sementara biomassa sel semakin meningkat sehingga mengakibatkan penurunan populasi seiring waktu.

Berdasarkan variasi *bulking agent* serbuk kayu, jumlah populasi tertinggi terdapat pada reaktor RN1 yaitu mencapai $1,56 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Sementara untuk *bulking agent* daun kering, populasi tertinggi terdapat pada reaktor RA4 yaitu mencapai $5,6 \cdot 10^7$ CFU/g tanah. Reaktor RN1 dengan penambahan *bulking agent* serbuk kayu memiliki jumlah populasi yang lebih besar dibandingkan reaktor kontrol (RN7) namun tidak untuk reaktor dengan penambahan *bulking agent* daun kering, dimana reaktor RN7 memiliki jumlah populasi yang lebih besar yaitu $1,32 \cdot 10^8$ CFU/g tanah.

Total Populasi Bakteri Autotrof Anaerob

Berikut **Gambar 5** menyajikan total populasi bakteri autotrof dari sembilan variasi reaktor anaerob pada penelitian ini.



Gambar 5. Hubungan total populasi bakteri autotrof anaerob terhadap waktu.

Berdasarkan **Gambar 5** diatas terlihat bahwa total populasi bakteri autotrof dari sembilan reaktor anaerob (RN1 - RN9) mengalami peningkatan seiring dengan waktu pengolahan namun di akhir proses populasi bakteri mengalami penurunan. Total populasi bakteri pada awal pengolahan berada pada kisaran $9,8 \cdot 10^1$ - $4,7 \cdot 10^2$ CFU/g tanah dan di akhir pengolahan berada pada kisaran $8,6 \cdot 10^2$ - $1,08 \cdot 10^4$ CFU/g tanah.

Pertumbuhan tertinggi bakteri autotrof anaerob rata-rata terjadi pada hari ke-40 dengan kisaran $5,6.10^3 - 9,7.10^5$ CFU/g tanah.

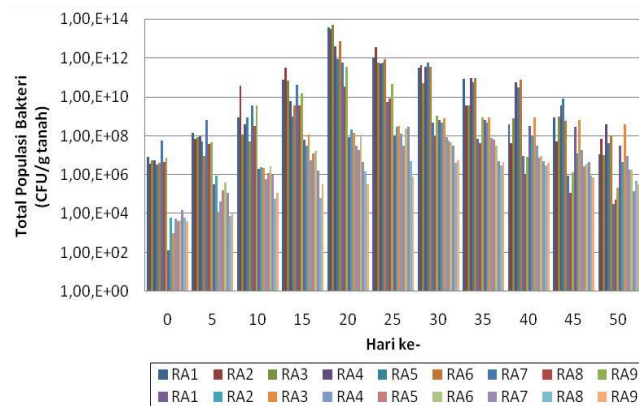
Peningkatan populasi yang terjadi seiring dengan waktu pengolahan dikarenakan bakteri autotrof mampu memanfaatkan ketersediaan CO_2 pada *sludge* sebagai sumber karbon dan mengoksidasi senyawa anorganik sebagai sumber energi. Ketersediaan senyawa anorganik tersebut berasal dari proses konversi bakteri heterotrof anaerobik dalam mendekomposisi nitrogen organik menjadi amonium. Amonium tersebut selanjutnya dapat dimanfaatkan oleh bakteri autotrof untuk pertumbuhannya (Nindrasari *et al.*, 2011). Reduksi amonia menjadi gas nitrogen dalam kondisi anoxic menggunakan nitrit sebagai akseptor elektron. Reaksi stoikiometriknya sebagai berikut : $NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2 H_2O$ (Nindrasari *et al.*, 2011).

Berdasarkan variasi *bulking agent* serbuk kayu, populasi tertinggi terdapat pada reaktor RN1 yaitu mencapai $6,0.10^4$ CFU/g tanah. Sementara untuk *bulking agent* daun kering, populasi tertinggi terdapat pada reaktor RN4 yaitu mencapai $9,7.10^5$ CFU/g tanah. Penambahan daun kering menghasilkan jumlah populasi lebih besar daripada penambahan serbuk kayu. Sementara reaktor dengan variasi *sludge* memiliki jumlah yang tidak jauh berbeda dengan kontrol.

Dinamika Populasi Heterotrof dan Autotrof

Dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof yang terjadi selama pengolahan dapat dilihat berdasarkan pertumbuhan populasi dari masing-masing kelompok bakteri tersebut dalam prosesnya mendegradasi *sludge produced water* secara aerob dan anaerob seiring dengan waktu pengolahan. Berdasarkan **Gambar 6** dan **Gambar 7** berikut terlihat jelas terjadinya dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof selama penelitian. Pertumbuhan bakteri heterotrof dan autotrof pada penelitian terjadi secara berurutan. Dinamika yang terjadi tergantung pada adanya ketersediaan sumber karbon yang digunakan oleh masing-masing kelompok bakteri tersebut. Berikut **Gambar 6** menyajikan dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada proses aerob selama penelitian.

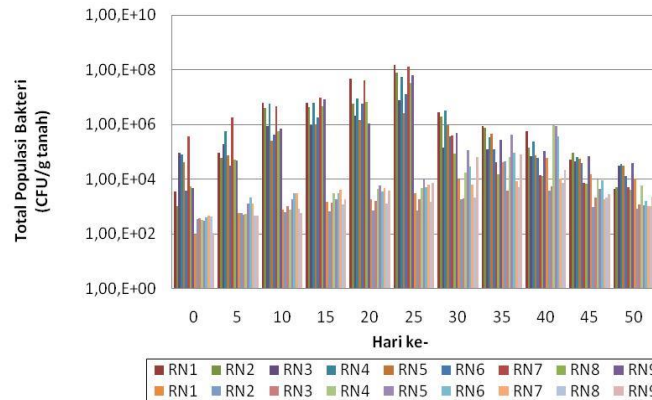
Pada awal pengolahan bakteri heterotrof lebih mendominasi dan memiliki jumlah populasi yang lebih tinggi dibandingkan bakteri autotrof. Pada titik tertentu dimana sumber C-organik sudah terbatas dan tidak mungkin lagi untuk diuptake oleh bakteri heterotrof, maka bakteri autotrof tumbuh dominan karena pada saat tersebut telah muncul mineral-mineral golongan N yang dapat dimanfaatkan oleh bakteri autotrof. Jumlah populasi bakteri heterotrof lebih besar daripada bakteri autotrof pada penelitian ini.



Gambar 6. Dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada proses aerob.

Pada proses aerob, nilai C-organik awal mencapai kisaran 54,42%BK - 86,77%BK dengan populasi bakteri heterotrof berkisar antara $3,4.10^6 - 5,7.10^7$ CFU/g tanah. Sementara nilai N-total awal berada pada kisaran 0,12%BK - 0,77%BK dengan populasi bakteri autotrof hanya $1,28.10^2 - 1,52.10^4$ CFU/g tanah. Pada akhir pengolahan nilai C-organik berada pada kisaran 33,64%BK - 52,68%BK dengan

populasi bakteri heterotrof hanya berkisar antara $3,2 \cdot 10^4$ - $4,1 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Sementara pada akhir pengolahan nilai N-total mencapai 2,08%BK -3,03%BK dengan populasi bakteri autotrof berkisar antara $1,42 \cdot 10^5$ - $4,0 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Berikut **Gambar 7** menyajikan dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada proses anaerob selama penelitian.



Gambar 7. Dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada proses anaerob.

Pada proses anaerob, nilai C-organik awal mencapai kisaran 50,11%BK - 84,92 %BK dengan populasi bakteri heterotrof berkisar antara $1,01 \cdot 10^3$ - $3,8 \cdot 10^8$ CFU/g tanah. Sementara nilai N-total awal berada pada kisaran 0,35%BK - 0,94%BK dengan populasi bakteri autotrof hanya berada pada kisaran $9,8 \cdot 10^1$ - $4,7 \cdot 10^2$ CFU/g tanah. Pada akhir pengolahan nilai C-organik berada pada kisaran 23,73%BK - 47,23%BK dengan populasi bakteri heterotrof hanya berkisar antara $4,1 \cdot 10^3$ - $3,7 \cdot 10^4$ CFU/g tanah. Sementara nilai NTK mencapai 1,29%BK - 3,53%BK dengan populasi bakteri autotrof berada pada kisaran $8,6 \cdot 10^2$ CFU/g - $1,08 \cdot 10^4$ CFU/g tanah.

Ketersediaan C-organik yang awalnya tinggi pada *sludge* semakin berkurang seiring penggunaannya oleh bakteri heterotrof. Namun ketersediaan senyawa anorganik semakin meningkat akibat metabolisme bakteri heterotrof yang menghasilkan CO_2 dan senyawa sederhana yang dapat dimanfaatkan oleh bakteri autotrof sebagai sumber karbon berikutnya.

Kinetika Reaksi Pada Variasi Reaktor Aerob dan Anaerob

Kinetika reaksi pada penelitian ini akan mengarah pada laju pertumbuhan dan laju kematian bakteri heterotrof dan autotrof untuk mengetahui proses optimum yang terjadi pada reaktor. Berikut **Tabel 2** menyajikan rekapitulasi laju pertumbuhan (μ) dan laju kematian (K_d) bakteri heterotrof dan autotrof pada penelitian.

Berdasarkan **Tabel 2.** diatas diperoleh bahwa laju pertumbuhan (μ) setiap kelompok bakteri pada proses aerob maupun anaerob lebih besar dibandingkan laju kematiannya (K_d). Pada proses aerob, laju pertumbuhan paling besar terdapat pada reaktor RA2 (untuk bakteri heterotrof) dan RA3 (untuk bakteri autotrof). Sementara pada proses anaerob, laju pertumbuhan paling besar terdapat pada reaktor RN1 (untuk bakteri heterotrof) dan RN5 (untuk bakteri autotrof anaerob). Dengan demikian keempat reaktor tersebut merupakan reaktor paling optimum pada penelitian.

Tabel 2. Rekapitulasi laju pertumbuhan (μ) dan laju kematian (K_d) bakteri heterotrof dan autotrof pada variasi reaktor penelitian.

Reaktor aerob	Heterotrof aerob		Autotrof aerob		Reaktor anaerob	Heterotrof anaerob		Autotrof	
	μ (col/ hari)	K_d (col/ hari)	μ (col/ hari)	K_d (col/ hari)		μ (col/ hari)	K_d (col/ hari)	μ (col/hari)	anaerob
RA1	0,740	0,460	0,441	0,183	RN1	0,412	0,317	0,147	
RA2	0,807	0,488	0,354	0,322	RN2	0,401	0,277	0,188	
RA3	0,772	0,388	0,468	-	RN3	0,167	0,080	0,061	
RA4	0,622	0,285	0,415	0,120	RN4	0,233	0,211	0,176	
RA5	0,560	0,351	0,298	0,231	RN5	0,178	0,177	0,197	
RA6	0,696	0,369	0,418	0,171	RN6	0,330	0,154	0,144	
RA7	0,451	0,465	0,347	0,218	RN7	0,224	0,206	0,066	
RA8	0,449	0,478	0,284	0,111	RN8	0,344	0,137	0,069	
RA9	0,548	0,489	0,224	0,191	RN9	0,338	0,130	0,189	

KESIMPULAN

Berdasarkan pemaparan pada bagian hasil pembahasan diatas dapat dibuat suatu kesimpulan bahwa dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada penelitian ini tergantung pada ketersediaan sumber karbon yang digunakan oleh masing-masing kelompok bakteri tersebut. Pertumbuhan bakteri heterotrof dan autotrof terjadi secara berurutan. Tingginya rasio C-organik pada awal pengolahan berbanding lurus dengan jumlah populasi bakteri heterotrof, sebaliknya menurunnya C-organik dan terjadinya peningkatan senyawa N akan diikuti dengan peningkatan populasi bakteri autotrof. Total populasi bakteri heterotrof lebih besar daripada bakteri autotrof, baik pada proses aerob maupun anaerob. Populasi tertinggi bakteri heterotrof aerob mencapai $3,3 \cdot 10^{10}$ - $4,9 \cdot 10^{13}$ CFU/g tanah (pada hari ke-20), bakteri autotrof aerob mencapai $4,2 \cdot 10^6$ - $8,3 \cdot 10^8$ CFU/g tanah (pada hari ke-30), bakteri heterotrof anaerob mencapai $2,56 \cdot 10^6$ - $1,56 \cdot 10^8$ CFU/g tanah (pada hari ke-25), dan bakteri autotrof anaerob mencapai $5,6 \cdot 10^3$ - $9,7 \cdot 10^5$ CFU/g tanah (pada hari ke-40). Reaktor pengolahan paling optimum pada penelitian ini terdapat pada reaktor RA2 (untuk bakteri heterotrof aerob) dengan μ 0,807 koloni/hari, RA3 (untuk bakteri autotrof aerob) dengan μ 0,468 koloni/hari, RN1 (untuk bakteri heterotrof anaerob) dengan μ 0,412 koloni/hari dan RN5 (untuk bakteri autotrof anaerob) dengan μ 0,197 koloni/hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Anand, Theivasigamani., Gunalan, Balakrishnan., Pandurangan, Padmavathy., V, Rani., Anand, Chandran. (2014). *Influence of C/N Ratios on the Heterotrophic Activity of Model Brackishwater Systems. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies.* **2014;1(3):12-21.** ISSN: 2347-5129.
- Chatterjee, SN., Syed, AA., Mukhopandhyay, B. (2014): *Diversity of Soil Bacteria In Some Village Areas Anjoining to Joypur Forest of Vankura District of West Bengal, India. International Journal of Environmental Biology* **2014; 4(1): 67-70.** ISSN 2277-386X.
- Igunnu, Ebenezer, T., George, Z. Chen. (2012). *Produced Water Treatment Technologies.* Nottingham, UK. *International Journal of Low-Carbon Technologies Advance Access.*
- Igwe, C.O., Saadi, A.A.L., Ngene, S.E. (2013). *Optimal Options for Treatment of Produced Water in Offshore Petroleum Platforms. Journal Pollution Effect and Control.*
- Marsh, T.L., Saxman, P., Cole, J., Tiedje, J. (2000). *Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism Analysis Program, A Web-based Research Tool for Microbial Community Analysis.* Appl Environmental Microbiology 66:3616-3620.
- Nindrasari, Gabriela., Irene, Meitiniarti., Jubhar, Christian, Mangimbulude. (2011). *Pengurangan Kadar Amonium Pada Limbah Cair Industri Terasi melalui Proses Nitrifikasi dan Anammox*

- Menggunakan Kombinasi Kultur Aerob-Anaerob*. Prosiding Seminar Nasional Kimia Unesa 2011 – ISBN : 978-979-028-378-7.
- Parwanayoni, Ni Made Susun. (2008). *Pergantian Populasi Bakteri Heterotrof, Algae dan Protozoa di Lagoon BTDC Unit Penanganan Limbah Nusa Dua Bali*. Jurnal Bumi Lestari, Vol. 8 No. 2, Hal 180-185.
- Prabandari, Poppy Palupi. (2005). *Pengaruh Penambahan Bakteri dan Sekam Padi Pada Pengomposan*. Teknik Lingkungan. ITB:Bandung.
- Republik Indonesia. (1999). Peraturan Pemerintah No.85 Tahun 1999 tentang *Perubahan Atas Peraturan Pemerintah No.18 Tahun 1999 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Jakarta.
- Republik Indonesia. (2003). Lampiran Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.128 Tahun 2003 tentang *“Tata Cara Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi Secara Biologis”*
- Republik Indonesia. (2011). Peraturan Menteri Pertanian No.70 Tahun 2011 tentang *Pupuk organik, pupuk hayati, dan pembenah tanah*. Jakarta.
- Rodriguez, A.M.P., Vazquez, R.R. (2013). *Optimization of C/N Ratio and Inducers for Wastewater Paper Industry Treatment Using Trametes versicolor Immobilized in Bubble Column Reactor*. Journal of Mycology. ID 536721.
- Sarkar, Payel., Mukesh, Meghvanshi., Rajni, Singh. (2011). *Microbial Consortium: A New Approach in Effective Degradation of Organic Kitchen Wastes*. India. *International Journal of Environmental Sciences and Development*.