

Biodegradasi Limbah Organik Pasar dengan Menggunakan Mikroorganisme Alami Tangki Septik

Paramita P, Maya Shovitri dan N D Kuswytasari
 Jurusan Biologi, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: maya@biologi.its.ac.id

Abstrak — Limbah organik merupakan limbah yang paling besar mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme alami tangki septik sebagai inokulum dalam mendegradasi bahan organik yang terdapat pada limbah pasar. Limbah yang telah ditambah dengan pupuk NPK 0,1% dan urea 10% diinkubasi selama 5 hari, dan diuji nilai BOD, COD, TSS, TDS dan pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme alami tangki septik mampu mendegradasi bahan organik dalam limbah pasar. Hal ini ditunjukkan oleh perubahan parameter BOD dari 1830 mg/l menjadi 600 mg/l, COD dari 1640 mg/l menjadi 226,7 mg/l, TSS dari 0,85 mg/l menjadi 0,19 mg/l, TDS dari 3,76 mg/l menjadi 4,587 mg/l dan pH dari 2 menjadi 9.

Kata Kunci—Limbah Organik, Degradasi, Mikroorganisme Alami Tangki Septik

I. PENDAHULUAN

PENCEMARAN lingkungan berhubungan erat dengan limbah. Permasalahan limbah timbul karena tidak seimbangnya produksi limbah dengan pengolahannya dan semakin menurunnya daya dukung alam sebagai tempat pembuangan limbah [1]. Menurut penelitian yang dilakukan JICA (*Japan International Cooperation Agency*) bekerjasama dengan Pemerintah Kota Surabaya tahun 1993 dan 2005, kegiatan yang dilakukan rumah tangga (domestik) dan pasar menghasilkan limbah organik sebanyak 79,19% [2]. Sekitar 90% air limbah tersebut langsung dibuang ke badan air (sungai) [3]. Pengaruh utama limbah organik yang masuk ke dalam air adalah menurunkan kandungan oksigen terlarut dan meningkatkan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS) dan *Total Dissolved Solid* (TDS) yang merupakan parameter utama pencemaran air [4].

Salah satu cara untuk dapat mengurangi tingkat pencemaran air adalah dengan cara biologis menggunakan mikroorganisme [5]. Senyawa organik yang terdapat dalam limbah seperti protein, karbohidrat dan lemak dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber nutrisi untuk menghasilkan energi [6],[3]. Mikroorganisme yang dapat mengurai senyawa organik dapat diperoleh dari berbagai sumber, salah satunya bisa didapatkan dari tangki septik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah dan Pengolahan Limbah Secara Biologis

Pasar sebagai tempat perdagangan mempunyai potensi yang besar untuk menimbulkan sampah [7]. Limbah pasar tradisional meliputi bahan organik berupa sisa sayuran, buah, daun, nasi, dan lain-lain. Limbah pasar mengandung berbagai macam mikroba, diantaranya adalah protozoa, fungi, bakteri, dan virus [8].

Salah satu alternatif pengolahan limbah yang dapat diaplikasikan adalah pengolahan secara biologi yang dikenal sebagai biodegradasi. Biodegradasi didefinisikan sebagai suatu proses oksidasi senyawa organik oleh mikroorganisme, baik di tanah, perairan, atau pada instalasi pengolahan air limbah [9]. Biodegradasi terjadi karena bakteri dapat melakukan metabolisme zat organik melalui sistem enzim untuk menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi. Energi digunakan untuk sintesis, motilitas, dan respirasi [10].

B. Parameter Kualitas Air

Biochemical Oxygen Demand (BOD) adalah suatu analisis empiris yang mencoba mendekati secara global proses biologis yang terjadi didalam air. Angka BOD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan bakteri untuk menguraikan (mengoksidasi) hampir semua zat organik yang terlarut dan sebagian zat-zat organik yang tersuspensi dalam air. Penentuan BOD diperlukan untuk menentukan beban pencemaran akibat air buangan penduduk atau industri [11]. Dasar uji BOD adalah kemampuan metabolik mikroorganisme yang ditambahkan sebagai agen pendegradasi. Semakin tinggi BOD, maka semakin banyak bahan organik yang terkandung dalam air.

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik secara kimiawi [12]. COD merupakan uji yang dilakukan untuk menentukan kandungan senyawa organik *biodegradable* (mudah terurai) dan *non-biodegradable* (tidak mudah terurai) [13]. Tes COD digunakan untuk menghitung kadar bahan organik yang dapat dioksidasi secara kimia dengan menggunakan dikromat dalam media asam [14].

Zat padat tersuspensi (*Total Suspended Solid*) adalah semua zat padat (pasir, lumpur, dan tanah liat) atau partikel-partikel yang tersuspensi dalam air dan dapat berupa komponen hidup (biotik) seperti fitoplankton, zooplankton, bakteri, fungi, ataupun komponen mati (abiotik) seperti detritus dan partikel-partikel anorganik [15].

Total Dissolved Solid atau padatan terlarut adalah padatan-padatan yang mempunyai ukuran lebih kecil dari padatan tersuspensi. Bahan-bahan terlarut pada perairan alami tidak bersifat toksik, akan tetapi jika berlebihan dapat meningkatkan nilai kekeruhan yang selanjutnya akan menghambat penetrasi cahaya matahari dan mempengaruhi proses fotosintesis diperairan [16].

Derajat keasaman (pH) merupakan istilah yang digunakan untuk menyatakan intensitas keadaan asam atau basa sesuatu larutan. pH merupakan salah satu faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi kehidupan mikroorganisme dalam air [17].

C. Mikroorganisme Tangki Septik

Fungsi utama dari tangki septik adalah untuk memisahkan padatan, lemak dan minyak keluar dari limbah cair sebelum masuk kedalam saluran pebuangan. Ketika air limbah melewati tangki septik, padatan yang lebih berat akan terbenam dibawah dan mengalami degradasi oleh bakteri. Reduksi ini akan mengubah kuantitas dari padatan dan komposisi menjadi lumpur, yang berada dibawah tangki [18].

Bakteri-bakteri patogen yang terdapat di dalam feses manusia diantaranya termasuk dalam familia *Enterobacteriaceae* [19]. Coliform juga merupakan bakteri yang selalu ada dalam pencernaan hewan dan manusia yang ditemukan dalam limbah. Bakteri yang termasuk dalam kelompok ini adalah *Escherichia coli*, *Klebsiella*, *Enterobacter* dan *Citrobacter*. *Escherichia coli* merupakan bakteri yang hanya ditemukan dan berasal dari feses hewan berdarah panas maupun manusia [20]. Selain bakteri juga terdapat fungi dalam tangki septik. Fungi biasanya merupakan organisme saprofit, mereka memperoleh makanan dari degradasi bahan organik yang telah mati [21]. Jamur sangat penting dalam penjernihan air seperti halnya dengan bakteri menggunakan partikel organik terlarut. Jamur tidak melaksanakan proses fotosintesis dan dapat tumbuh pada daerah lembab dengan pH rendah, suatu kondisi dimana bakteri tidak bisa hidup [22].

III. METODOLOGI

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan September-Oktober 2011 di Laboratorium Mikrobiologi dan Bioteknologi, Jurusan Biologi ITS Surabaya dan Laboratorium Botani ITS Surabaya.

B. Sumber Inokulum dan Limbah Organik

Inokulum diambil dari tangki septik asrama ITS Surabaya secara aseptis dengan menggunakan jerigen. Limbah organik pasar diambil dari sampah yang ada di pasar Genteng Surabaya. Sampel air limbah pasar berasal dari air bekas cucian ikan dan sampel limbah padat berupa sayur-sayuran.

C. Pembuatan Medium Limbah Organik

Sampel limbah organik diblender sampai halus, kemudian disaring. Kemudian ditambahkan 0.1 % NPK dan 10% urea dari volume limbah [23] dan diaduk hingga homogen.

D. Inokulasi Mikroorganisme Tangki Septik pada Medium Limbah Organik

Mikroorganisme alami tangki septik diinokulasikan ke dalam medium limbah organik sebesar 1:4 (v/v). Sedangkan pada kontrol negatif tidak ditambahkan mikroorganisme alami tangki septik maupun bioaktivator.

E. Uji Parameter

Parameter BOD diuji dengan menggunakan metode dilakukan mengacu pada [24], uji COD dilakukan mengacu pada [25], TSS dan TDS mengacu pada [4] dan pH diuji dengan menggunakan kertas pH. Uji parameter dilakukan pada hari ke-0 dan ke-5.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

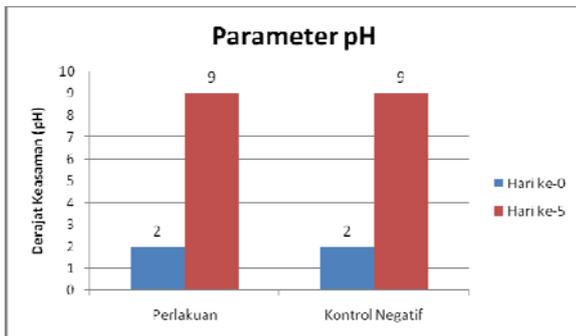
Penelitian ini dilakukan untuk mengolah limbah pasar dengan parameter BOD, COD, TSS, TDS dan pH. Limbah pasar berasal dari sayur-sayuran dan air cucian ikan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kemampuan inokulum mikroorganisme alami tangki septik dalam mendegradasi bahan organik yang terdapat pada limbah pasar. Rasio volume inokulum tangki septik dan limbah adalah 1 : 4 (v/v) yang selanjutnya disebut perlakuan. Ada tiga kali ulangan yang disebut dengan perlakuan 1, perlakuan 2 dan perlakuan 3. Kontrol negatif berupa limbah tanpa penambahan inokulum mikroorganisme alami tangki septik. Karena limbah yang digunakan tidak disterilisasi, sehingga apabila terjadi perubahan nilai parameter pada kontrol negatif, ada kemungkinan disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme *endogenous* dalam limbah tersebut. Dan apabila terjadi penurunan nilai parameter pada perlakuan, maka dianggap sebagai hasil akumulasi degradasi mikroorganisme alami dari tangki septik dan mikroorganisme *endogenous* limbah.

Limbah pasar mengandung bahan organik berupa karbohidrat, protein, minyak dan lemak [26]. Dalam limbah ditambahkan pupuk NPK sebanyak 0.1 % dari volume limbah dan pupuk urea sebanyak 10 % dari volume limbah. Tujuan dari pemberian pupuk NPK dan urea ini untuk aktivasi awal inokulum mikroorganisme alami tangki septik.

A. Derajat Keasaman (pH)

Berdasarkan hasil yang didapatkan, terdapat perubahan nilai pH dari 2 menjadi 9 pada perlakuan dan kontrol negatif. Adanya perubahan pH menunjukkan terjadinya proses biodegradasi bahan organik (Gambar 1). Nilai pH pada awal proses degradasi anaerob akan meningkat, kemudian menurun. Peningkatan pH terjadi saat proses hidrolisis dimana H^+ digunakan untuk mengkatalisis reaksi pemutusan ikatan pada polisakarida, lipid dan protein [27]. Peningkatan pH menunjukkan adanya kegiatan mikroorganisme menguraikan bahan organik seperti karbohidrat yang diuraikan menjadi

glukosa [28]. Setelah itu terjadi proses asidogenesis dan asetogenesis. Tahap asidogenesis dilakukan oleh berbagai kelompok mikroorganisme, yang mayoritas adalah mikroorganisme obligat anaerob dan anaerob fakultatif [27]. Pada proses ini terjadi penurunan pH karena adanya asam organik yang dihasilkan seperti asam butirat, propionat, dan asetat [28]. Selanjutnya pH cenderung mengalami peningkatan karena asam organik diuraikan menjadi metana dan karbondioksida [27]. Namun pada penelitian ini, nilai pH mengalami peningkatan pada uji hari ke-5, hal ini dapat disebabkan karena proses yang terjadi di dalam reaktor sudah memasuki tahap penguraian asam organik. Proses penguraian asam organik mulai terjadi setelah berlangsung lebih dari 2 hari [29],[10].



Gambar 1. Grafik Perubahan pH selama 5 Hari Masa Inkubasi

Berdasarkan parameter pH, kemampuan mikroorganisme alami tangki septik dalam mendegradasi bahan organik pada perlakuan memiliki nilai yang sama dengan kontrol negatif.

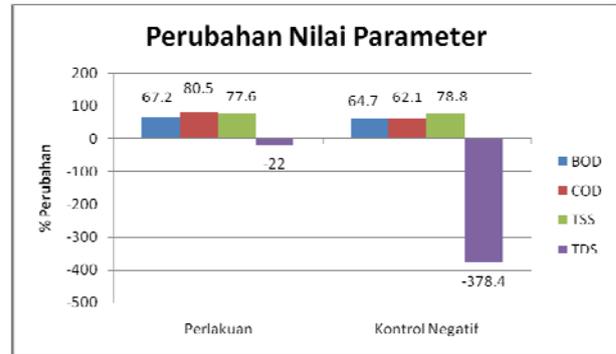
B. Perubahan nilai BOD, COD, TSS dan TDS

Berdasarkan parameter BOD, COD dan TSS, mikroorganisme alami tangki septik juga memiliki kemampuan yang hampir sama dengan mikroorganisme *endogenous* dalam limbah pasar.

Proses biodegradasi yang terjadi dalam limbah dapat dilihat dari nilai BOD yang semakin menurun [30]. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) merupakan nilai senyawa organik yang mudah terdegradasi. Nilai ini ditunjukkan dalam milligram oksigen yang dibutuhkan mikroorganisme untuk mendegradasi bahan organik dalam satu liter air [31]. Semakin kecil kadar BOD menunjukkan bahwa jumlah bahan organik dalam limbah sedikit, sebab oksigen yang dibutuhkan juga semakin sedikit [27]. Senyawa organik akan diubah menjadi CO₂, H₂O, NH₄ dan massa bakteri sebagai sumber energi [26]. Semakin kecil penurunan nilai BOD dalam suatu proses pengolahan limbah, menunjukkan bahwa semakin kecil proses degradasi yang terjadi. Pada perlakuan, terdapat penurunan nilai BOD sebesar 67,2%, sedangkan pada kontrol negatif terdapat penurunan BOD sebesar 64,7% (Gambar 2).

Adanya proses degradasi juga dapat ditunjukkan dengan semakin menurunnya nilai COD, TSS dan TDS [32],[4]. Sama seperti pada parameter BOD, semakin kecil perubahan nilai COD, TSS dan TDS menunjukkan semakin kecil proses degradasi yang terjadi. Berdasarkan parameter COD dapat dilihat bahwa mikroorganisme alami tangki septik mampu mendegradasi bahan organik pada limbah pasar sebesar

80,5%, sedangkan pada kontrol negatif sebesar 62,1% (Gambar 2).



Gambar 2. Persentase Perubahan Nilai Parameter Setelah 5 Hari Masa Inkubasi

Parameter selanjutnya adalah *Total Suspended Solid* (TSS) yaitu jumlah berat zat yang tersuspensi dalam volume tertentu di dalam air yang dinyatakan dengan mg/l [33]. Semakin kecil penurunan nilai TSS pada pengolahan limbah, menunjukkan proses degradasi bahan organik juga semakin kecil.

Penurunan *total solid* dapat disebabkan proses degradasi oleh mikroorganisme pada limbah pasar yang mengandung bahan organik berupa protein, lemak, dan karbohidrat rantai panjang. Semakin menurunnya kadar TSS terjadi karena bahan organik mengalami degradasi pada saat proses hidrolisis. Selama proses hidrolisis, padatan tersuspensi berkurang karena telah berubah menjadi terlarut [27]. Zat-zat yang tersuspensi dalam air biasanya terdiri dari fitoplankton, zooplankton, lumpur, kotoran, tumbuhan, bakteri dan fungi [33]. Berdasarkan parameter TSS, kontrol negatif memiliki kemampuan mendegradasi bahan organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan. Dimana penurunan TSS perlakuan hanya sebesar 77,6% (Gambar 2).

Perubahan nilai parameter yang paling terlihat berbeda adalah parameter TDS, dimana pada perlakuan nilai TDS mengalami peningkatan sebesar 22%, sedangkan pada kontrol negatif peningkatan nilai TDS sebesar 378,4% (Gambar 2). Adanya proses degradasi juga ditunjukkan semakin menurunnya nilai TDS [32], [4]. Peningkatan nilai TDS, dapat disebabkan karena adanya proses pemecahan bahan organik yang tadinya merupakan *suspended solid* menjadi berukuran lebih kecil [34]. Seharusnya, meskipun terdapat bahan organik yang tadinya berukuran TSS didegradasi menjadi berukuran TDS, nilai TDS tetap mengalami penurunan karena bahan organik tersebut digunakan mikroorganisme sebagai sumber energi. Pada penelitian ini, nilai TDS yang meningkat diduga karena proses penggunaan bahan organik sebagai sumber energi oleh mikroorganisme belum sempurna.

V. KESIMPULAN

Mikroorganisme alami tangki septik memiliki kemampuan yang seimbang dengan mikroorganisme *endogenous* dalam mendegradasi bahan organik yang terkandung dalam limbah pasar, hal ini dapat dilihat dari perubahan nilai parameter BOD sebesar 67,2%, COD sebesar 80,5%,TDS sebesar 77,6% dan pH yang mengalami peningkatan menjadi 9.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Rizaldi, "Pengelolaan Sampah Secara Terpadu Di Perumahan Dayu Permai Yogyakarta". Universitas Islam Indonesia (2008).
- [2] Christianto, "Menakar Potensi Sampah Pasar". Available: <http://tirtaamartya.wordpress.com/2007/06/19/sampah-pasar-2/>(2007).
- [3] L. A. Sasongko. "Kontribusi Air Limbah Domestik Penduduk Di Sekitar Sungai Tuk Terhadap Kualitas Air Sungai Kaligarang Serta Upaya Penanganannya (Studi Kasus Kelurahan Sampangan dan Benda Ngisor Kecamatan Gajah Mungkur Kota Semarang)". Universitas Diponegoro., Semarang (2006).
- [4] W. P. Lestari. "Perbedaan EM-4 dan Starbio dalam Menurunkan Kadar TSS dan TDS Limbah Cair Batik Brotojoyo di Desa Karangpilang, Kecamatan Masaran Kabupaten Sragen". Universitas Muhammadiyah Surakarta., Surakarta (2008).
- [5] N. Pohan. "Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Dengan Proses Biofilter Aerobik". Universitas Sumatera Utara., Medan (2008).
- [6] A. M. Gownor. *Water Quality in Catchment Ecosystems*. John Willey & Sons: New York (1980).
- [7] I. W. Jana, N. K. Mardani, Suyasa dan I. W. Budiarsa, "Analisis Karakteristik Sampah Dan Limbah Cair Pasar Badung Dalam Upaya Pemilihan Sistem Pengelolaannya". ISSN 1907-5626. ECOTROPIC. VOLUME 1 (2) hal 2 (2006)
- [8] E. T. Marlina, Y. A. Hidayati, E. Harlia, "Pengaruh Penambahan Berbagai Starter Pada Proses Pengomposan Limbah Pasar Tradisional Terhadap Penurunan Jumlah Bakteri Total dan Koliform". Universitas Padjajaran., Bandung, (2011).
- [9] N. P. Cheremisinoff, "Biotechnology For Waste And Wastewater Treatment". USA: Noyes Publications 66 (1996).
- [10] A. Husin, "Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Dengan Biofiltrasi Anaerob dalam Reaktor Fixed-Bed". Universitas Sumatera Utara., Medan (2008).
- [11] Y. Gunawan, "Peluang Penerapan Produksi Bersih Pada Sistem Pengolahan Air Limbah Domestik Waste Water Treatment Plant #48 , Studi Kasus di PT Badak NGL Bontang". Universitas Diponegoro., Semarang (2006).
- [12] N. I. Milasari. "Pengolahan Limbah Cair Kadar Cod Dan Fenol Tinggi Dengan Proses Anaerob Dan Pengaruh Mikronutrient Cu : Kasus Limbah Industri Jamu Tradisional". Available: http://eprints.undip.ac.id/11892/1/Bab_1-5_skripsi_nurita-sukma.pdf. (2010).
- [13] A. Kumar, P. Dhall and K. Rita, "Redefining BOD:COD Ratio Of Pulp Mill Industrial Wastewaters in BOD Analysis by Formulating a Spesific Microbial Seed". International Biodeterioration and Biodegradation 64 : 197-202 1(2010).
- [14] MetCalf and Eddy, "Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse", 4th edition. New York : McGraw Hill Book Co 93, 563-566 (2003).
- [15] M. S. Tarigan, Edward, "Kandungan Total Zat Padat Tersuspensi (Total Suspended Solid) di Perairan Raha". LIPI. Sulawesi Tenggara. Makara, Sains, Vol. 7 (3) 1 (2003).
- [16] Azwir, "Analisis Pencemaran Air Sungai Tapung Kiri oleh Limbah Industri Kelapa Sawit PT. Peputra Masterindo di Kabupaten Kampar". Universitas Diponegoro., Semarang (2006).
- [17] Sutrisno, C. T dan E. suciastuti, "Teknologi Penyediaan Air Bersih". Rineka Cipta: Jakarta 32, 73 (2002).
- [18] Departemen of Health Australia. "Understanding Septic Tank Systems". Environmental Health Directorate., Australia (2011).
- [19] P. Triatmodjo, "Tinjauan Mikrobiologi Makanan, Minuman dan Air Pada Beberapa Rumah Sakit di Jakarta". Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan, Departemen Kesehatan RI, Jakarta (1993).
- [20] I. Sutapa, "Pengaruh Kepadatan Myriophyllum sp terhadap Jumlah Fecal Coliform Di Situ Cibuntu". Pusat Penelitian Limnologi-LIPI., Jakarta (2006).
- [21] M. H. Gerardi, "Wastewater Bacteria". New Jersey: John Wiley & Sons, Inc (2006) 4-5, 19.
- [22] Sugiharto. "Dasar-dasar pengolahan Limbah Cair". Universitas Indonesia: Jakarta 16, 23, 28 (2005).
- [23] I. W. B. Suyasa, W. Dwijani, "Pengaruh Penambahan Urea, Kompos Cair, dan Campuran Kompos Dengan Gula Terhadap Kandungan BOD dan COD Pada Pengolahan Air Limbah Pencelupan". Universitas Udayana, Bali. Ecotrophic 4 (1) 62-65 (2009).
- [24] Ardeniswan, Y. Mulyati, Tontowi dan A. Rahman, "Evaluasi Kembali Metode Analisis Untuk Penetapan Nilai BOD Di Indonesia", Buletin IPT. Vol III (2) 3-4 (1997).
- [25] APHA AWWA, WEF, "Standart of Methods For The Examination of Water And Waste Water". 20 th Edition (1998).A. Yani. "Pengaruh Penerapan Prosedur Pengujian Pada Temperatur Ruang Terhadap Nilai Kebutuhan Oksigen Biokimia (KOB)". Universitas Sumatera Utara., Medan (2009).
- [26] G. Bitton, "Waste Water Microbiology". Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc hal 59, 68, 215-216 (2005).
- [27] S. N. Chotimah, "Pembuatan Biogas dari Limbah Makanan dengan Variasi dan Suhu Substrat dalam Biodigester Anaerob". Universitas Negeri Sebelas Maret., Surakarta (2010).
- [28] B. Iswanto, W. Astono, Sunaryati, "Pengaruh Penguraian Sampah Terhadap Kualitas Air Ditinjau dari Perubahan Senyawa Organik Dan Nitrogen Dalam Reaktor Kontinyu Skala Laboratorium". Volume 4 No. 1 (2007) 3.
- [29] J. F. Andrews, R. D. Cole and E. A. Pearson, "Kinetics and Characteristics of Multistage Methane Fermentation" (1962).
- [30] A. Fatha, "Pemanfaatan Zeolit Aktif Untuk Menurunkan BOD dan COD Limbah Tahu. Skripsi". Jurusan Kimia Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam., Universitas Negeri Semarang., Semarang (2007).
- [31] P. G. Smith, J. G. Scott, "Dictionary of Water and Waste Management", Second Edition. Great Britain: IWA Publishing 65 (2005).
- [32] F. R. Wirda and M. Handajani, "Degradation of Organik Compound in Liquid Phase Biowaste With Additional Water Variation at Ratio 1:2 in Batch Reaktor". Institut Teknologi Bandung., Bandung (2011).
- [33] S. Djasio, Pedoman Bidang Studi Penyediaan Air Bersih. Jakarta: Depkes RI 82-83 (1984).
- [34] R. B. Seabloom, "University Curriculum Development for Decentralized Wastewater Management : Septic Tanks". Emeritus Professor of Civil and Environmental Engineering Dept., of Civil and Environmental Engineering., University of Washington (2004).