

DISINTEGRASI DINDING SEL MIKROBA LUMPUR BIOLOGI INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI KERTAS SECARA TERMO-ALKALI DAN SONIKASI

Saepulloh¹, Rina S. Soetopo, Krisna Septiningrum

Balai Besar Pulp dan Kertas, Jl. Raya Dayeuhkolot No. 132, Bandung 40258, Indonesia

¹ saefull911@gmail.com

Diterima: 4 April 2016, Revisi akhir: 13 Juni 2016, Disetujui terbit: 24 Juni 2016

MICROBIAL CELL WALL DISINTEGRATION OF BIOLOGICAL SLUDGE FROM PAPER INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT PLANT USING THERMO - ALKALINE AND SONICATION

ABSTRACT

Waste Water Treatment Plant (WWTP) of paper mills generates biological sludge containing organic compounds such as microbial biomass in the range of 60-90%. The sludge is voluminous and difficult dewatered causing problems during handling and utilization. Microbial cell wall disintegration using thermo-alkaline and sonication disrupt microbial cell walls so sludge handling and utilization is easier for further use. Cell wall disruption of biological sludge pre-treatment using thermo-alkaline, sonication and combination of both treatments has been conducted. Thermo-alkaline treatment was carried out for 24 hours with temperature variations (20°C, 37°C, 50°C) and pH (9, 10, 11); sonication treatment was performed at high frequency (30 ± 10 kHz) with a variation of time (15, 30, and 45 minutes), and the combination of both treatments was performed at the optimum conditions respectively. The effectiveness of treatment was evaluated based on the increase of soluble COD (COD_f) and ratio of COD_f/COD_T with univariate statistical test (SPSS 16.0). The results showed that the thermo-alkaline treatment is more effective than sonication and combination treatment. The best condition was obtained when sludge treated with thermo-alkaline treatment at pH 10 and temperature 37°C, COD_f was increased 439.91%, with ratio of COD_f/COD_T 0,128.

Keywords: biological sludge, cell disintegration, thermo-alkaline, sonication, COD_f

ABSTRAK

Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) industri kertas menghasilkan lumpur biologi yang mengandung senyawa organik berupa biomassa mikroba berkisar 60-90%. Lumpur tersebut bersifat *voluminous* dan sulit dihilangkan airnya sehingga menimbulkan masalah pada penanganan dan pemanfaatannya. Perlakuan termo-alkali dan sonikasi merupakan metode disintegrasi sel terhadap lumpur biologi yang dilakukan untuk memecah dinding sel mikroba sehingga dapat lebih mudah dalam penanganan dan pemanfaatan selanjutnya. Penelitian termo-alkali, sonikasi, dan gabungannya terhadap lumpur biologi telah dilakukan. Perlakuan termo-alkali dilakukan selama 24 jam dengan variasi suhu (20°C, 37°C, 50°C) dan pH (9, 10, 11); perlakuan sonikasi dilakukan pada frekuensi tinggi (30 ± 10 kHz) dengan variasi waktu (15, 30, dan 45 menit), dan perlakuan gabungan termo-alkali dan sonikasi dilakukan pada kondisi optimum masing-masing. Efektivitas perlakuan dievaluasi berdasarkan peningkatan COD terlarut (COD_f) dan rasio COD_f/COD_T dengan uji statistik *univariate* (SPSS 16.0). Hasil percobaan menunjukkan bahwa perlakuan termo-alkali lebih efektif dibandingkan dengan perlakuan sonikasi dan gabungannya. Kondisi terbaik perlakuan termo-alkali adalah pada pH 10 dan suhu 37°C dengan peningkatan COD_f 439,91% dengan rasio COD_f/COD_T 0,128.

Kata kunci : Lumpur biologi, disintegrasi sel, termo-alkali, sonikasi, COD_f

PENDAHULUAN

Di Indonesia, pada tahun 2012 jumlah industri pulp dan kertas terdapat 5 industri pulp dan 79 industri kertas dengan kapasitas terpasang masing-masing 7,9 juta ton pulp per tahun dan 12,17 juta ton kertas per tahun. Dengan kapasitas produksi tersebut, Indonesia tercatat menempati peringkat kesembilan dunia. Pada tahun 2011, kapasitas produksi industri pulp dan kertas Indonesia menguasai 3,6% dari kapasitas produksi global (APKI dalam duniaindustri.com). APKI telah menargetkan volume produksi industri pulp dapat mencapai 20,4 juta ton dan kertas sebesar 19,8 juta ton pada tahun 2020 (Tasbieh, dkk. 2015).

Dalam proses produksinya, industri kertas menggunakan air cukup tinggi dan sebagai konsekwensinya akan menghasilkan air limbah yang jumlahnya juga tinggi yaitu sekitar 35 - 50 m³/ton (Permen LH No. 05 tahun 2014). Dalam pengelolaan lingkungannya, industri kertas umumnya dilengkapi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang sebagian besar menerapkan sistem biologi aerobik proses lumpur aktif. Penerapan proses lumpur aktif tersebut sesuai dengan karakteristik air limbah industri kertas yang pencemar utamanya adalah senyawa organik yang sebagian besar bersifat terlarut setelah melalui perlakuan pada operasi *fibre and water recovery*.

Proses lumpur aktif (*activated sludge*) baik yang konvensional maupun yang sudah dimodifikasi merupakan metode pengolahan air limbah utama bagi industri kertas (Buyukkamaci dan Koken, 2010). Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sistem lumpur aktif menghasilkan lumpur biomassa mikroba (*secondary sludge*) dalam jumlah cukup besar yaitu sekitar 0,3 - 1,0 m³/ton produk dengan dasar kadar padatan 0,5 - 1 % (Soetopo dkk., 2011). Pada umumnya, lumpur biologi dalam pengolahannya dicampur dengan lumpur primer, kemudian dipekatkan dan dihilangkan kadar airnya selanjutnya dibuang ke *landfill* atau dibakar. Kedua cara pengolahan lumpur biologi tersebut tidak efektif karena pembuangan lumpur biologi ke *landfill* dapat mengakibatkan terjadinya pencemaran air tanah dan pembentukan emisi gas metan yang berbahaya, sedangkan pembakaran lumpur biologi akan memerlukan energi yang sangat tinggi untuk pengeringannya karena tingginya kandungan air pada lumpur biologi tersebut (Bayr dkk., 2013).

Proses digestasi anaerobik merupakan salah satu teknologi alternatif pengolahan lumpur biologi yang cukup menjanjikan karena dapat menghasilkan biogas sebagai sumber energi terbarukan, mengurangi volume lumpur yang harus dibuang, membunuh sebagian besar mikroba patogen dan menghilangkan bau (Appels dkk., 2008; Neyens dan Baeyens, 2003). Namun proses digestasi anaerobik lumpur biologi pada umumnya memerlukan waktu tinggal yang cukup lama dengan efisiensi degradasi total (*overall degradation efficiency*) senyawa organik yang relatif rendah yaitu berkisar 30-50% (Tyagi dkk., 2014). Hal tersebut terjadi karena dinding sel mikroba pada lumpur biologi resisten terhadap proses degradasi secara biologi, sehingga pada tahap hidrolisis, biomassa mikroba yang merupakan senyawa organik kompleks sulit untuk diurai menjadi senyawa sederhana yang siap untuk didegradasi pada tahap selanjutnya (Appels dkk., 2008). Dinding sel mikroba merupakan struktur yang kaku (*semi-rigid*) dan mengandung rantai glikan yang berikatan silang (*cross linked*) dengan rantai peptida sehingga tahan terhadap proses biodegradasi dan melindungi sel dari lisis (Appels dkk., 2008). Dalam upaya mengatasinya diperlukan metode untuk mendisintegrasi sel mikroba yang merupakan komponen organik utama pada lumpur biologi.

Penelitian-penelitian terkait metode disintegrasi sel mikroba lumpur biologi sebagai pra perlakuan untuk menghancurkan dinding sel mikroba baik secara termal, kimia, mekanis dan biologi telah banyak dilakukan (Tyagi dkk., 2014; Bayr dkk., 2013; Carrere dkk., 2012; Bougrier dkk., 2008). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan menggunakan termo-alkali dan sonikasi merupakan metode yang paling efektif untuk memecahkan dinding sel mikroba pada lumpur biologi (Appels dkk., 2008). Pecahnya dinding sel mikroba tersebut menyebabkan sel lisis sehingga materi organik yang berada di dalam sel akan lepas sehingga lebih mudah untuk didegradasi pada tahapan selanjutnya terkait pengolahan lumpur biologi (Bougrier dkk., 2007, Elliot dan Mahmood, 2007).

Perlakuan termo-alkali merupakan gabungan dari perlakuan termal (panas) dengan perlakuan kimia (alkali). Perlakuan termal pada umumnya menggunakan suhu yang cukup tinggi yaitu berkisar antara 60-220°C dengan tujuan untuk merusak ikatan kimia pada dinding dan membran sel sehingga mengakibatkan terjadinya pelarutan

isi sel mikroba (Appels dkk., 2008). Gavala dkk. (2003) menyatakan bahwa karakteristik lumpur biologi merupakan faktor utama untuk menentukan suhu, waktu optimum serta metode pelarutan isi sel mikroba. Semakin kompleks kandungan senyawa di dalam lumpur biologi maka suhu yang digunakan semakin tinggi dan waktu yang digunakan menjadi lebih lama. Pada perlakuan termo-alkali, bahan kimia bersifat basa seperti NaOH ditambahkan untuk membantu penghancuran dinding sel mikroba dan mengurangi suhu perlakuan yang tinggi, sehingga perlakuan termo-alkali umumnya dapat dilakukan pada temperatur yang relatif rendah (Neyens dan Baeyens, 2003). Pra perlakuan termo-alkali pada lumpur biologi dengan suhu tinggi 80 dan 120°C dan pH 8, 9, dan 10 mampu meningkatkan produksi metan lebih dari 58% (Carrere dkk., 2012). Pra perlakuan lumpur biologi IPAL industri kertas secara termal pada suhu 170°C dan secara termo-alkali pada suhu 140°C dan pH 12 diketahui mampu meningkatkan kandungan COD terlarut dan laju pembentukan gas metan sejumlah lebih besar dari enam kali dan sepuluh kali (Wood dkk., 2009).

Appels dkk. (2008) menyatakan perlakuan sonikasi merupakan metode yang paling efektif untuk menghancurkan dinding sel mikroba. Sonikasi menyebabkan disintegrasi flok, menipiskan dinding sel mikroba akibatnya membran sel menjadi lebih mudah rusak. Perubahan pada membran sel tersebut memudahkan pelepasan materi pada sel sehingga ukuran partikel lumpur menurun (Li dkk., 2010; Bayr dkk., 2013). Proses sonikasi dilakukan dengan menggunakan frekuensi tinggi, sehingga sel mikroba menjadi hancur, proses penghancuran sel ini diawali dengan kavitasi sel kemudian diikuti dengan reaksi kimiawi yaitu terbentuknya senyawa radikal akibatnya terjadi disintegrasi lumpur dan lisis sel (Carrere dkk., 2010; Pilli dkk., 2011). Pra perlakuan secara sonikasi terhadap lumpur biologi IPAL industri pulp menggunakan frekuensi 20 KHz (1 W/mL) mampu meningkatkan kandungan COD terlarut sampai 30% (Wood dkk. 2009). Penelitian lain menyebutkan pra perlakuan lumpur biologi IPAL industri kertas menggunakan ultrasonik pada 0,75W/mL selama 15-60 menit mampu meningkatkan kandungan COD terlarut sebesar 58% (Tyagi dkk., 2014).

Pada penelitian sebelumnya, perlakuan termo-alkali menggunakan suhu cukup tinggi

(di atas 100°C) (Carrere dkk., 2012; Wood dkk., 2009) membutuhkan pasokan energi cukup besar sehingga merupakan kendala dan sulit untuk diaplikasikan di industri. Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian ini pemecahan dinding sel mikroba pada lumpur biologi IPAL industri kertas secara termo-alkali telah dilakukan pada suhu yang lebih rendah dan penambahan basa yang diharapkan dapat memecah dinding sel mikroba dengan kebutuhan energi yang lebih rendah. Pada penelitian ini juga dilakukan percobaan disintegrasi sel secara sonikasi dan gabungan antara termo-alkali dan sonikasi pada kondisi optimum yang diperoleh pada masing-masing perlakuan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efisiensi ketiga metode tersebut dalam meningkatkan kelarutan material organik pada lumpur biologi. Pada penelitian ini diharapkan dapat menemukan kondisi optimum pra perlakuan yang mampu meningkatkan kandungan organik terlarut pada lumpur biologi yang siap untuk didegradasi pada tahap selanjutnya pada proses digestasi anaerobik. Dengan meningkatnya kelarutan materi organik di dalam lumpur biologi, diharapkan efisiensi proses digestasi anaerobik lumpur biologi meningkat, diikuti dengan meningkatnya jumlah metan yang dihasilkan pada waktu retensi yang lebih singkat.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan percobaan adalah lumpur biologi dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) industri kertas di daerah Subang. Bahan kimia NaOH 5% (w/v) digunakan sebagai pengkondisi pH pada perlakuan termo-alkali dan gabungannya dengan proses sonikasi.

Peralatan

Peralatan yang digunakan pada percobaan termo-alkali antara lain pH meter (YSI 100A) untuk pengukuran dan pengaturan pH lumpur, *water shaker bath* (Fisher Scientific) dan inkubator 20°C (Velp Scientifica) untuk mengatur suhu. Percobaan sonikasi dilakukan menggunakan sonikator (Sonic Ruptor 400). Peralatan pendukung lainnya adalah pengaduk magnetik (Health *multipurpose stirrer*) untuk persiapan sampel, agitator (Heidolph) untuk homogenisasi

lumpur, oven (Memmert) dan tanur (Vulcan A-550) untuk penentuan kadar TS dan VS, *centrifuge* (Fisher Centrific) untuk memisahkan endapan lumpur dengan supernatannya dan beberapa peralatan gelas antara lain botol serum berukuran 500 mL, gelas piala, dan gelas ukur.

Metode Penelitian

A. Karakterisasi Lumpur Biologi IPAL

Lumpur biologi IPAL diambil dari *secondary clarifier* IPAL pabrik kertas berbahan baku kertas bekas di Subang, Jawa Barat. Lumpur biologi dipisahkan hingga kadar padatan (TS) sekitar 2-3% dengan cara dekantasi selama pengendapan 24 jam, kemudian disimpan pada suhu 4°C sampai akan digunakan. Karakterisasi dilakukan terhadap lumpur biologi hasil pemekatan yang telah dihomogenkan.

Beberapa parameter yang dianalisis yaitu pH, COD total, dan COD terlarut (COD_f), *Total Solid* (TS) dan *Volatile Solid* (VS). Pengujian dilakukan di Balai Besar Pulp dan Kertas (BBPK) Bandung, dengan mengacu pada SNI tahun 2009, kecuali parameter TS dan VS mengacu pada AWWA (APHA 2012).

B. Tahapan Percobaan

Percobaan Disintegrasi Dinding Sel Mikroba pada Lumpur Biologi

Percobaan dilakukan pada skala laboratorium menggunakan rancangan acak kelompok (RAK) dengan 3 (tiga) cara yaitu termo-alkali, sonikasi, dan gabungan proses termo-alkali dan sonikasi, dengan replikasi masing-masing tiga kali. Perlakuan percobaan dari masing-masing cara sebagai berikut:

- **Secara Termo-Alkali**

Percobaan dilakukan di dalam botol serum berukuran 500 mL. Variabel pada perlakuan termo-alkali adalah suhu (20; 37; 50 °C) dan pH (9; 10; 11). Pengaturan pH lumpur biologi dilakukan dengan penambahan larutan NaOH 5% (w/v). Jumlah penambahan larutan NaOH pada pengaturan pH per 100 mL lumpur biologi adalah sebagai berikut : 0,42 mL untuk pH 9; 1,1 mL untuk pH 10; dan 2 mL untuk pH 11. Sebanyak 400 mL lumpur biologi yang telah diatur pH-

nya sesuai dengan perlakuan, dipanaskan pada suhu sesuai perlakuan selama 24 jam di dalam inkubator (suhu 20°C) dan *water bath* (suhu 37 dan 50°C). Sampel dari masing-masing perlakuan kemudian diambil untuk dianalisis lebih lanjut.

- **Secara Sonikasi**

Percobaan disintegrasi dinding sel mikroba dalam lumpur biologi dengan cara sonikasi dilakukan di dalam gelas kimia berukuran 1000 mL. Sebanyak 400 mL lumpur biologi disonikasi dengan variasi waktu sonikasi yaitu 15, 30, dan 45 menit pada frekuensi 30 ± 10 kHz. Selanjutnya dilakukan sampling untuk dianalisis lebih lanjut.

- **Gabungan Termo Alkali dan Sonikasi**

Percobaan disintegrasi dinding sel mikroba dalam lumpur biologi dengan cara gabungan termo-alkali dan sonikasi. Percobaan dilakukan terhadap 400 mL lumpur biologi yang diawali dengan proses termo-alkali selama 24 jam pada pH dan suhu optimum kemudian dilanjutkan dengan proses sonikasi pada waktu optimum.

Parameter Pengamatan dan Evaluasi Data

Parameter pengamatan pada semua variasi perlakuan pada percobaan disintegrasi dinding sel mikroba dalam lumpur biologi adalah pH, COD_f , TS, dan VS yang dianalisis pada awal dan akhir percobaan. Pengujian dilakukan di laboratorium BBPK, Bandung, dengan mengacu pada SNI tahun 2009. Evaluasi data dilakukan terhadap data COD_f dan ratio COD_f/COD_t dengan metode statistik *univariate* menggunakan perangkat lunak SPSS versi 16.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lumpur Biologi IPAL Industri Kertas

Data karakteristik lumpur biologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Lumpur biologi yang digunakan pada percobaan ini cenderung bersifat netral (pH 7,05 \pm 0,18) dengan kadar padatan total (TS) 3,64 \pm 0,13%. Lumpur biologi memiliki kadar VS cukup tinggi yaitu 2,61 \pm 0,43% atau sekitar 71,7% dari kadar padatan total, yang artinya kandungan lumpur biologi didominasi oleh senyawa organik.

Tingginya senyawa organik tersebut karena lumpur berupa biomasa mikroba yang berasal dari proses lumpur aktif pada sistem pengolahan air limbah. Biomasa mikroba merupakan kumpulan sel mikroba yang memiliki dinding sel yang sulit didegradasi karena adanya ikatan antara glikan dengan rantai peptida (Appels dkk., 2008). Kandungan senyawa organik pada lumpur biologi sebagian besar bersifat tersuspensi dan hanya sekitar 2 % yang bersifat terlarut. Hal tersebut tampak dari rasio COD terlarut terhadap COD total yang sangat kecil, yaitu 0,02.

Tabel 1. Karakteristik Lumpur Biologi Sekunder yang Digunakan

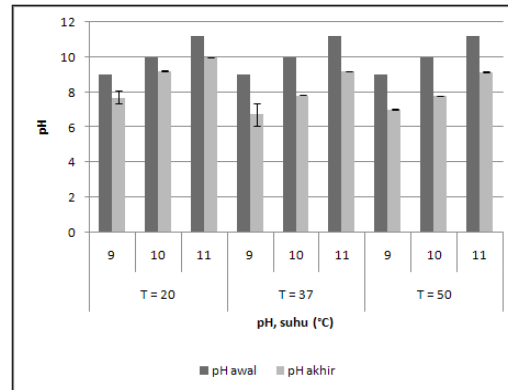
| Parameter | Nilai Uji |
|-----------------------------|---------------|
| pH | 7,05 ± 0.18 |
| TS (%) | 3,64 ± 0,13 |
| VS (%) | 2,61 ± 0,43 |
| Abu (%) | 1,03 ± 0,30 |
| COD _f (mg/L) | 343 ± 24 |
| COD _{total} (mg/L) | 16.678 ± 1520 |

Disintegrasi Dinding Sel Mikroba pada Lumpur Biologi

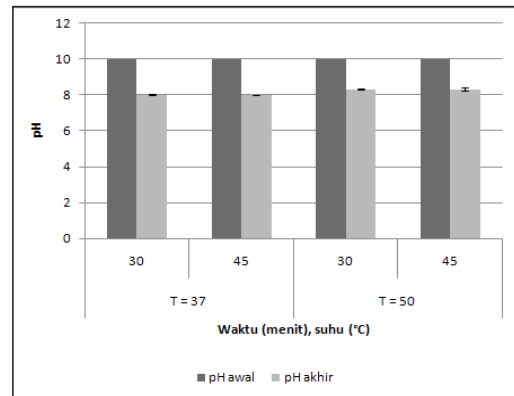
Penurunan pH

Perlakuan termo-alkali mengakibatkan terjadinya penurunan pH lumpur biologi setelah 24 jam perlakuan untuk semua variasi perlakuan baik variasi pH maupun suhu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Penurunan pH lumpur biologi tersebut dapat terjadi karena terbentuknya asam amino hasil hidrolisis protein dari biomassa mikroba yang terdapat pada lumpur biologi (Harris, 2007). Penurunan pH ini menguntungkan untuk aplikasi di industri karena tidak perlu dilakukannya penambahan asam untuk proses netralisasi lumpur biologi yang pada awal perlakuan sudah diatur pada pH tinggi (Cardell, 2010). Hal yang berbeda ditunjukkan oleh perlakuan sonikasi, perlakuan ini tidak mengakibatkan perubahan pH lumpur biologi yang signifikan. Berdasarkan data pada Gambar 1 juga dapat diketahui bahwa setiap variasi kombinasi perlakuan mengakibatkan penurunan pH lumpur biologi yang cukup signifikan. Secara umum diketahui variasi suhu dan waktu sonikasi tidak mengakibatkan perbedaan penurunan pH yang nyata, sehingga dapat diasumsikan bahwa

faktor utama yang mengakibatkan penurunan pH pada lumpur biologi adalah hasil perlakuan dengan NaOH. Perbedaan penurunan pH lumpur biologi dapat dilihat pada variasi suhu yang digunakan pada perlakuan termo-alkali, dimana penurunan pH yang lebih besar terjadi pada suhu 37°C. Sedangkan variasi waktu pada tahapan sonikasi tidak mengakibatkan perbedaan penurunan pH di akhir percobaan.



(a)



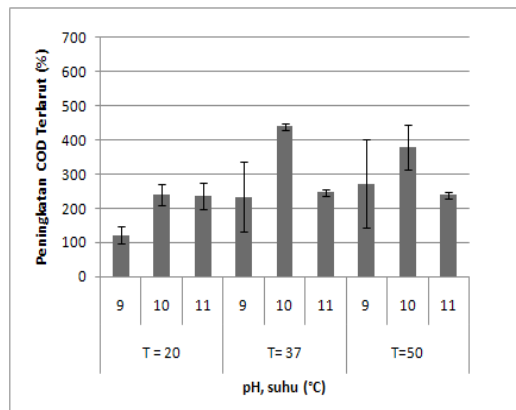
(b)

Gambar 1. Perubahan pH Lumpur Biologi pada Pra-Perlakuan Termo-Alkali (a) serta Gabungan Termo-Alkali dan Sonikasi (b)

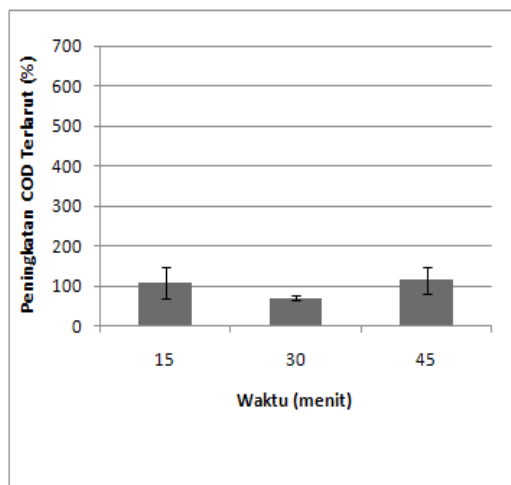
Peningkatan Kadar COD Terlarut

Perlakuan termo-alkali dan sonikasi terhadap lumpur biologi, umumnya dilakukan untuk memecahkan dinding sel mikroba (Appels dkk., 2008), sehingga dapat meningkatkan efektifitas kinerja pengolahan lumpur biologi selanjutnya yang antara lain pengolahan secara anaerobik (Appels dkk., 2008; Bougrier dkk., 2006; Bayr dkk., 2013; Cardell 2010; Carrere dkk., 2010). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan termo-alkali dan sonikasi dapat menghancurkan

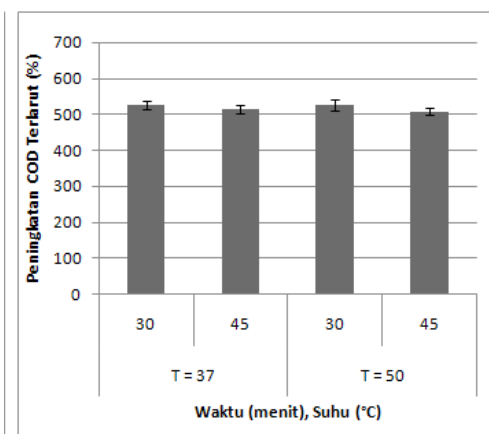
dinding sel dan matriks flok pada lumpur sehingga dapat meningkatkan solubilitas bahan organik yang ditunjukkan dari meningkatnya kadar COD_f (Gambar 2).



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. Pengaruh Perlakuan Termo-Alkali (a), Sonikasi (b), dan Gabungan Termo-Alkali dan Sonikasi (c) terhadap Peningkatan Kandungan COD_f pada Lumpur Biologi

Hasil uji statistik data persentase peningkatan COD_f pada perlakuan termo-alkali, sonikasi dan gabungannya menunjukkan hasil yang berbeda nyata. Perlakuan termo-alkali pada suhu 37°C dan pH 10 dengan nilai peningkatan COD_f sebesar 439,9% merupakan perlakuan terbaik jika dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Perlakuan ini menunjukkan perbedaan nyata dengan semua perlakuan waktu pada proses sonikasi, namun tidak berbeda nyata terhadap seluruh perlakuan gabungan termo-alkali-sonikasi (persentase peningkatan COD_f 508,33 - 527,21%) (Tabel 2). Peningkatan persentase kandungan COD_f tersebut menunjukkan nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil penelitian Rani dkk. (2012) yaitu sebesar 25% pada pH 12 dan suhu 80°C, namun persentase peningkatan kandungan COD_f pada percobaan ini jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil penelitian Bougrier dkk. (2006) pada suhu 130°C dan pH 10 yang menunjukkan persentase peningkatan kandungan COD_f diatas 1900%.

Perlakuan waktu antara 15 menit sampai 45 menit pada proses sonikasi tidak menunjukkan kenaikan COD_f yang berbeda nyata. Kenaikan kandungan COD_f hasil perlakuan sonikasi berada pada kisaran 65,97% - 110,89% dan berbeda nyata jika dibandingkan kenaikan kandungan COD_f terendah yang diperoleh dari hasil perlakuan termo-alkali pada suhu 20°C dan pH 9 yaitu sebesar 121,23% (Tabel 2).

Berdasarkan hasil penelitian tersebut diketahui bahwa kinerja proses sonikasi masih dibawah proses termo-alkali. Hasil serupa juga diperoleh oleh Wood dkk. (2009) yang menggunakan lumpur biologi yang berasal dari proses kraft dan sulfit dimana kandungan COD terlarut hasil perlakuan sonikasi pada frekuensi 20 kHz lebih rendah jika dibandingkan hasil perlakuan termal dan alkali. Hasil serupa juga diperoleh pada penelitian yang telah dilakukan oleh Wood (2008), dimana perlakuan termal-kimia pada lumpur biologi industri kertas menghasilkan peningkatan COD terlarut yang jauh lebih tinggi, yaitu dari 3% menjadi 63% jika dibandingkan dengan peningkatan COD terlarut hasil perlakuan sonikasi yaitu dari 8% menjadi 17,6%.

Pada perlakuan sonikasi, kenaikan kandungan organik terlarut terjadi karena proses disintegrasi flok, yang menyebabkan dinding sel menjadi lebih tipis sehingga membran sel lebih mudah rusak akibatnya materi sel terlepas dari sel dan dapat langsung digunakan untuk proses

Tabel 2. Hasil Analisis Statistik Persentase Peningkatan Kandungan COD_f

| | Perlakuan Percobaan | | | Rata-rata Peningkatan COD _f (%) |
|--------------|---------------------|----|---------------|--|
| | Suhu (°C) | pH | Waktu (menit) | |
| Termo-alkali | 20 | 9 | 1440 | 121,23 (a) |
| | | 10 | | 240,09 (b) |
| | | 11 | | 237,74 (b) |
| | 37 | 9 | | 234,09 (b) |
| | | 10 | | 439,91 (cd) |
| | | 11 | | 246,26 (b) |
| | 50 | 9 | | 271,94 (b) |
| | | 10 | | 378,96 (c) |
| | | 11 | | 238,50 (b) |
| Sonikasi | - | - | 15 | 104,20 (a) |
| | | | 30 | 65,97 (a) |
| | | | 45 | 110,89 (a) |
| Gabungan | 37 | 10 | 30 | 525,37 (d) |
| | | | 45 | 515,54 (d) |
| | 50 | 10 | 30 | 527,21 (d) |
| | | | 45 | 508,33 (d) |

Ket: Nilai rata-rata yang ikuti huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada $\alpha < 0,05\%$

pengolahan lumpur biologi selanjutnya yang antara lain proses anaerobik. Selain itu juga dapat menurunkan ukuran partikel lumpur, dan inaktivasi mikroba pada lumpur (Li dkk., 2010; Bayr dkk., 2013). Mekanisme proses sonikasi dengan menggunakan frekuensi tinggi adalah menghancurkan sel yang diawali dengan kavitasasi sel diikuti dengan reaksi kimiawi yaitu terbentuknya senyawa radikal akibatnya terjadi disintegrasi lumpur dan lisis sel (Carrere dkk., 2010; Pilli dkk., 2011).

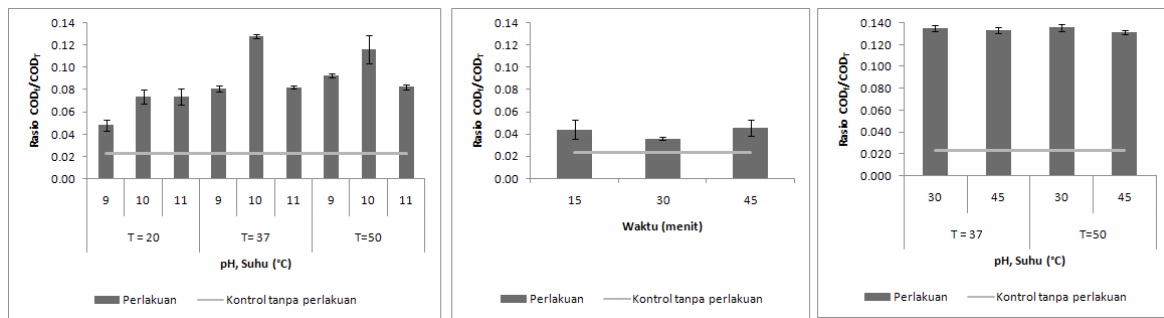
Rendahnya kinerja proses sonikasi berdasarkan parameter COD_f dapat disebabkan oleh singkatnya waktu sonikasi untuk menghancurkan sel mikroba (Davidson dan Jansen, 2006), namun waktu yang digunakan pada penelitian ini sudah cukup untuk memecah-mecah lumpur biologi yang terlihat dari fisik lumpur yang rusak setelah proses sonikasi. Selain itu, Carrere dkk. (2010) menyatakan sonikasi menyebabkan pelarutan dan reduksi ukuran partikel yang minimal dari lumpur biologi, namun meningkatkan biodegradasi fraksi partikulat. Pengaruh proses ini baru terlihat setelah pengolahan lumpur lanjutan dilakukan

yang diantaranya adalah proses hidrolisis dan digestasi anaerob (Dhar dkk., 2012; Elbeshbishy dkk., 2011).

Rasio COD Terlarut terhadap COD Total

Solubilisasi material organik dari hasil pemecahan dinding sel mikroba juga dapat dilihat dari parameter rasio COD terlarut terhadap COD total (COD_f/COD_T) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil percobaan menunjukkan secara umum semua perlakuan baik termo-alkali, sonikasi maupun gabungan keduanya mampu meningkatkan rasio COD_f/COD_T lumpur biologi menjadi di atas rasio COD_f/COD_T lumpur biologi tanpa perlakuan (kontrol) yang hanya 0,02.

Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa rasio COD_f/COD_T untuk masing-masing perlakuan menunjukkan hasil yang berbeda nyata dan perlakuan terbaik diperoleh pada perlakuan termo-alkali pada pH 10 suhu 37°C dan pH 10 suhu 50°C, serta perlakuan gabungan antara termo alkali-sonikasi yang rata-rata lebih besar dari empat kali rasio COD_f/COD_T lumpur biologi awal (Tabel 3).



Gambar 3. Pengaruh Perlakuan Termo-Alkali (a), Sonikasi (b), dan Gabungan Termo-Alkali dan Sonikasi (c) terhadap Rasio COD_f/COD_t Lumpur Biologi

Tabel 3. Hasil Analisis Statistik Ratio COD_f/COD_t

| | Perlakuan Percobaan | | | Rata-rata COD _f /COD _t |
|--------------|---------------------|----|---------------|---|
| | Suhu (°C) | pH | Waktu (menit) | |
| Termo-alkali | 20 | 9 | 1440 | 0,048 (ab) |
| | | 10 | | 0,074 (bc) |
| | | 11 | | 0,074 (bc) |
| | 37 | 9 | | 0,081 (c) |
| | | 10 | | 0,128 (e) |
| | | 11 | | 0,082 (c) |
| | 50 | 9 | | 0,093 (cd) |
| | | 10 | | 0,116 (de) |
| | | 11 | | 0,083 (c) |
| Sonikasi | | | 15 | 0,044 (ab) |
| | | | 30 | 0,036 (a) |
| | | | 45 | 0,046 (ab) |
| Gabungan | 37 | 10 | 30 | 0,135 (e) |
| | | | 45 | 0,133 (e) |
| | 50 | 10 | 30 | 0,136 (e) |
| | | | 45 | 0,132 (e) |

Ket: Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada $\alpha < 0,05\%$

Pada perlakuan termo-alkali, peningkatan kandungan materi organik terlarut terjadi karena perlakuan suhu dan NaOH yang digunakan menyebabkan rusaknya ikatan kimia antara dinding sel dan membran plasma sehingga komponen sel dan materi organik menjadi lebih mudah larut (Appels dkk., 2008; Appels dkk., 2010) sehingga kandungan COD_f meningkat. Peningkatan COD_f juga terjadi karena terjadinya degradasi dan pelepasan senyawa polimerik ekstraselular (EPS) seperti polisakarida, protein, asam nukleat dan *humic acid* (Appels dkk.,

2010) serta pelepasan air yang terikat pada bagian dalam sel (Weemaes dan Verstraete, 1998). Selain itu, perlakuan menggunakan NaOH menyebabkan materi organik kompleks dapat dipecah-pecah menjadi materi organik sederhana sehingga lebih mudah digunakan oleh mikroba. Pada dasarnya terdapat beberapa bahan kimia yang dapat digunakan untuk proses kimiawi seperti KOH, Ca(OH)₂ dan Mg(OH)₂ (Bougrier dkk., 2006; Cardell, 2010). Namun, beberapa penelitian menunjukkan NaOH memberikan efek yang lebih besar dibandingkan

bahan kimia lainnya (Appels dkk., 2008; Cardell, 2010; Grübel dan Suschka, 2014). Hasil penelitian ini sesuai dengan beberapa penelitian yang menyatakan penambahan NaOH dapat meningkatkan solubilisasi COD (Neyens dan Baeyens, 2003; Alvarez dkk., 2000). NaOH diketahui akan mempengaruhi kerapatan muatan di permukaan partikel lumpur, akibatnya merubah tolakan elektrostatis antar partikel lumpur biologi sehingga karakteristik koloid dari lumpur berubah. Perubahan tersebut berupa peningkatan deflokulasi dan penurunan flokulasi lumpur sehingga lumpur biomassa menjadi lebih mudah untuk didisintegrasi (Neyens dan Baeyens, 2003).

KESIMPULAN

Disintegrasi dinding sel mikroba dalam lumpur biologi IPAL industri kertas dapat terjadi melalui perlakuan termo-alkali dan sonikasi, yang ditunjukkan dengan meningkatnya kandungan COD_f lumpur biologi dan peningkatan rasio COD_f/COD_T. Peningkatan COD_f pada perlakuan terbaik/optimum diperoleh melalui proses termo-alkali sebesar 439,91% pada pH 10 dan suhu 37°C dengan rasio COD_f/COD_T sebesar 0,128. Sedangkan perlakuan gabungan antara termo alkali dengan proses sonikasi selama 30 menit diperoleh hasil tertinggi dengan peningkatan COD_f 525,37 % dan rasio COD_f/COD_T sebesar 0,135.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Alfi Rodiansyah yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Srihartini, Setiananingsih, Dedi Sofyan, dan Juliana Sibarani yang telah membantu dalam pengujian sampel hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Alvarez, J.M., Mac, S., dan Llabrès, P. 2000. Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes : An Overview of Research Achievements and Perspectives. *Bioresource Technology*. 74, 3-16

Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., dan Dewil, R. 2008. Principles and Potential of The Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34, 755–781

Appels, L., Degreè, J., der Bruggen, B.V., Impe, J.V., dan Dewil, R. 2010. Influence of Low Temperature Thermal Pre-treatment on Sludge Solubilisation, Heavy Metal Release and Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*. 101, 5743–5748

Bayr, S., Kaparaju, P., dan Rintala, J. 2013. Screening Pretreatment Methods to Enhance Thermophilic Anaerobic Digestion of Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment Secondary Sludge. *Chemical Engineering Journal*. 223, 479–486

Bougrier, C., Delgenès, J.P. dan Carrère, H. 2006. Combination of Thermal Treatments and Anaerobic Digestion to Reduce Sewage Sludge Quantity and Improve Biogas Yield. *Process Safety and Environmental Protection*. 84, B4, 280–284

Bougrier, C., Delgenès, J.P. dan Carrère, H. 2007. Impacts of Thermal Pre-treatments on The Semi Continuous Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge. *Biochemical Engineering Journal*. 34, 20–27

Bougrier, C., Delgenès, J.P. dan Carrère, H. 2008. Effect of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*. 139, 236-244

Buyukkamaci, N. dan Koken, E. 2010. Economic Evaluation of Alternative Waste Water Treatment Plant Options for Pulp and Paper Industry. *Science of the Total Environment*. 408: 6070–6078.

Cardell, L. 2010. “Anaerobic Digestion of Pre-treated Biological Sludge from Pulp and Paper Industry Using Heat, Alkali, and Electroporation”, Thesis, Department of Thematic Studies – Water and Environmental Studies, Linköping University, Linköping, Swedia

Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenès, J.P., Steyer, J.P., dan Ferrer, I. 2010. Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: A Review. *Journal of Hazardous Materials*. 183, 1–15

Carrere, H., Rafrafi, Y., Battimelli, A., Torrijos, M., Delgenes, J.P., dan Motte, C. 2012. Improving Methane Production During The Codigestion of Waste-Activated Sludge and Fatty Wastewater: Impact of Thermo-Alkaline Pretreatment on Batch and Semi-Continuous Processes. *Chemical Engineering Journal*. 210, 404–409

Davidson, A. dan Jansen, J.L.C. 2006. Pre-treatment of Wastewater Sludge before Anaerobic Digestion - Hygienisation, Ultrasonic Treatment, and Enzyme Dosing. *Vatten*. 62, 335–340

- Dhar, B.R., Nakhla, G., dan Ray, M.B. 2012. Techno-Economic Evaluation of Ultrasound and Thermal Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion of Municipal Waste Activated Sludge. *Waste Management*. 32, 542–549
- Elbeshbishy, E., Aldin, A., Hafez, H., Nakhla, G., dan Ray, M. 2011. Impact of Ultrasonication of Hog Manure on Anaerobic Digestability. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18, 164–171
- Elliot, A., dan Mahmood, T. 2007. Pretreatment Technologies for Advancing Anaerobic Digestion of Pulp and Paper Biotreatment Residues. *Water Research*. 41, 4273 – 4286
- Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, I.V., Westermann, P., dan Ahring, B.K. 2003. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*. 37, 4561-4572
- Grübel, K., dan Suschka, J. 2014. Hybrid Alkali-Hydrodynamic Disintegration of Waste-Activated Sludge before Two-Stage Anaerobic Digestion Process. *Environmental Science and Pollution Research*. 22, 10, 7258-7270
- Harris D.C. 2007. *Quantitative Chemical Analysis*, 7th ed, W.H. Freeman and Company, New York
- Li, L., Liu, G., Jin, R., Zhou, J., dan Wang, J. 2010. Kinetics Model for Combined (Alkaline + Ultrasonic) Sludge Disintegration. *Bioresource Technology*. 101, 8555–8557
- Neyens, E., dan Baeyens, J. 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazard Mater*. 98, 51–67
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R.J., Tyagi, R.D., dan Surampalli, R.Y. 2011. Ultrasonic Pretreatment of Sludge: A Review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18, 1–18
- Rani, R.U., Kumar, S.A., Yeom, I.T., Banu, J.R. 2012. Low Temperature Thermo-Chemical Pretreatment of Dairy Waste Activated Sludge For Anaerobic Digestion Process. *Bioresource Technology*. 103, 415–424
- Soetopo, R.S., Purwati, S., Setiawan, Y., Wardhana, K.H. 2011. Efektivitas Proses Kontinyu Digestasi Anaerobik Dua Tahap pada Pengolahan Lumpur Biologi Industri Kertas. *Jurnal Riset Industri*. Vol. V, No.2, 131-142
- Tasbieh, H., Adrianto, A., Sri, R.M. 2015. Pengaruh Waktu Detensi Terhadap Efisiensi Penyisihan COD Limbah Cair Pulp dan Kertas dengan Reaktor Kontak Stabilisasi. *Jurnal FTEKNIK*. Vol. 2, No. 1, 1-9
- Tyagi, V.K., Lo, S.L., dan Rajpal, A. 2014. Chemically Coupled Microwave and Ultrasonic Pre-Hydrolysis of Pulp and Paper Mill Waste-Activated Sludge: Effect on Sludge Solubilisation and Anaerobic Digestion. *Environmental Science and Pollution Research*. 21, 6205–6217
- Weemaes, M. dan Verstraete, W.H. 1998. Evaluation of Current Wet Sludge Disintegration Techniques. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 73, 83–92
- Wood, N., Tran, H., dan Master, E. 2009. Pretreatment of Pulp Mill Secondary Sludge for High-Rate Anaerobic Conversion to Biogas. *Bioresource Technology*. 100, 5729–5735