

APLIKASI PROSES DIGESTASI ANAEROBIK LUMPUR BIOLOGI INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI KERTAS

Rina S. Soetopo¹, Sri Purwati, Henggar Hardiani, Mukharomah Nur Aini, Krisna Adhitya Wardhana
Balai Besar Pulp dan Kertas, Jalan Raya Dayeuh Kolot No. 132 Bandung
¹ rnsusilowati@yahoo.com

Diterima : 12 Mei 2014, Revisi akhir : 13 Oktober 2014, Disetujui terbit : 3 November 2014

APPLICATION OF AN ANAEROBIC DIGESTION PROCESS OF BIOLOGICAL SLUDGE OF PAPER INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT PLANT

ABSTRACT

A continuous pilot scale study has been conducted to investigate the effectiveness of anaerobic digestion of biological sludge. The sludge has a total solid content of 0.53 % - 1.1 %, pH of 7.20 to 7.32. Its organic content is about 97 %, The research were conducted in two stages, which are acidification (performed in 3 m³ the Continously Stirred Tank Reactor/CSTR at pH of 5.5 to 6.0) and methanation (performed in 5 m³ the Up Flow Anaerobic Sludge Blanket/UASB reactor at pH 6.5 to 7.0). The retention time (RT) was gradually shortened from 6 days to 1 day for acidification and from 8 days to 2 days for methanation. The results showed that operating the CSTR at the RT of 1 day and the organic loading of 8.23 g Volatile Solid (VS)/m³.day could produce Volatile Fatty Acid (VFA) at an average value of 17.3 g/kg VS.day. Operating the UASB reactor at the RT of 2 days and the organic loading (Chemical Oxygen Demand/COD) of 2.4 kg COD/m³.day could produce biogas at an average value of 66.3 L/day, with an average methane content of 69.9%, methane rate of 0.17 L CH₄/g COD reduction or 19.06 L CH₄/kg VS. Furthermore, methanation could reduce COD at an average value of 51.2 %, resulting in the effluent average value of COD filtrate and COD total of 210.1 mg/L and 375.2 mg /L, respectively.

Keywords: acidification, methanation, CSTR, UASB, biogas

ABSTRAK

Percobaan digestasi anaerobik lumpur IPAL biologi industri kertas secara kontinyu skala pilot telah dilakukan di industri kertas dengan tujuan mengkaji efektivitas proses digestasi anaerobik dalam mengolah lumpur tersebut. Lumpur yang digunakan memiliki *total solids* sekitar 0,53% – 1,1%, pH netral (7,20 – 7,32) dengan komponen utama senyawa organik sekitar 97%. Percobaan dilakukan dalam dua tahap yaitu asidifikasi dalam reaktor CSTR berkapasitas 3 m³ pada pH 5,5 – 6,0 dan metanasi dalam reaktor UASB berkapasitas 5 m³ pada pH 6,5 – 7,0. Percobaan dilakukan dengan waktu retensi yang dipersingkat secara bertahap dari 6 hari ke 1 hari untuk proses asidifikasi dan dari 8 hari ke 2 hari untuk proses metanasi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pengoperasian reaktor CSTR dengan waktu retensi 1 hari dan beban organik 8,3 g VS/m³.hari dapat menghasilkan VFA rata-rata 17,3 g/kg VS.hari dengan kisaran 8,36 – 30,59 g/kg VS.hari, sedangkan pengoperasian reaktor UASB pada waktu retensi 2 hari dan beban organik 2,4 kg COD/m³.hari dapat menghasilkan biogas rata-rata 66,3 L/hari dengan kadar metana rata-rata 69,9% atau 0,17 L CH₄/g COD reduksi atau 19,06 L CH₄/kg VS. Selain itu proses metanasi dapat menurunkan COD terlarut rata-rata 51,2%, dengan konsentrasi effluen COD terlarut rata-rata 210,1 mg/L dan COD total rata-rata 375,2 mg/L.

Kata kunci: asidifikasi, metanasi, CSTR, UASB, biogas

PENDAHULUAN

Industri kertas menghasilkan limbah berupa lumpur biomassa mikroba dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sistem biologi dalam jumlah cukup besar sekitar 0,3 - 1,0 m³/ton produk dengan kadar padatan 0,5 - 1 %. Lumpur biomassa mikroba yang selanjutnya akan dinyatakan sebagai lumpur biologi memiliki komponen utama senyawa organik berkisar 60 - 90%. Lumpur biologi tersebut bersifat voluminus dan sulit dihilangkan airnya sehingga menimbulkan masalah pada penanganannya. Pada Industri pulp dan kertas, lumpur biologi biasanya dicampur dengan lumpur primer, dipadatkan, dilakukan pengurangan kadar air dan kemudian dibuang dengan cara *landfill* atau dibakar di insinerator. Penimbunan di *landfill* dapat menyebabkan nilai tambah dari material ini hilang serta dapat menimbulkan emisi udara dan pencemaran air. Sementara penanganan dengan insinerator dirasakan kurang efektif mengingat masih tingginya kadar air dari lumpur biologi (Bayr, 2013). Digestasi anaerobik dapat digunakan untuk mengolah lumpur industri pulp dan kertas menjadi energi terbarukan dalam bentuk biogas dan juga menghasilkan produk lain yang sudah bersifat stabil untuk dapat digunakan lebih lanjut (Mahmood dan Elliot, 2006). Berdasarkan sifat fisik dan komponen utama lumpur biologi dan didukung dari hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi proses digestasi anaerobik merupakan salah satu solusi yang perlu dikembangkan dan diaplikasikan di industri.

Proses degradasi anaerobik lumpur biologi merupakan penguraian bahan organik oleh bakteri anaerobik yang berlangsung tanpa oksigen bebas untuk menghasilkan gas metana (CH₄). Karlsson dkk. (2011) melaporkan bahwa dari reaktor CSTR yang dioperasikan pada suhu 37°C dengan menggunakan *waste activated sludge* yang berasal dari *kraft pulp mill* dapat menghasilkan metana sebanyak 120 m³ CH₄/ton VS sementara ketika menggunakan *waste activated sludge* dari *mechanical pulp mill* dapat dihasilkan metana sebanyak 180 m³ CH₄/tonVS. Bahan organik dalam reaktor anaerobik akan terurai oleh bakteri melalui dua tahap proses. Tahap pertama, bahan organik dikonversi dari bentuk suspensi menjadi bentuk cairan yang akan diuraikan menjadi asam lemah oleh bakteri pembentuk asam pada tingkat hidrolisis dan asidifikasi. Pada tahap ini, melalui proses hidrolisis terjadi penguraian

senyawa kompleks atau senyawa rantai panjang seperti protein, karbohidrat menjadi senyawa yang sederhana dengan atau tanpa penambahan enzim. Selanjutnya proses asidifikasi berlangsung dengan pembentukan asam dari senyawa sederhana tersebut. Setelah bahan organik berubah menjadi asam, maka proses metanasi berlanjut pada proses tahap kedua yaitu pembentukan biogas yang sebagian besar berupa gas metana.

Biogas yang dihasilkan dapat dipertimbangkan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar minyak yang dapat diperbaharui. Nilai kesetaraan biogas terhadap beberapa bahan bakar adalah 1 m³ biogas setara dengan 0,4 kg minyak diesel atau 0,6 kg bensin atau 0,8 kg batubara (Polprasert, 1989). Pemanfaatan biogas sebagai hasil proses digestasi anaerobik, sejalan dengan Peraturan Presiden RI No. 5 Tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak. Selain dihasilkan biogas, proses digestasi anaerobik ini juga menghasilkan sisa endapan lumpur (*slurry*) yang mengandung unsur-unsur hara yang dapat dimanfaatkan langsung sebagai pupuk organik yang memiliki nilai ekonomi.

Bagi industri kertas, mengolah lumpur dengan memperoleh produk samping berupa biogas dan pupuk yang memiliki nilai ekonomi akan memberikan prospek sangat menguntungkan bagi pengelolaan lingkungan. Beberapa manfaat yang dapat diperoleh dari digestasi anaerobik antara lain:

- Mencegah emisi gas metana ke udara sebagai penyumbang emisi gas rumah kaca yang paling berbahaya yaitu 21 kali gas CO₂.
- Mengubah material organik menjadi biogas (60-70 vol % dari metana, CH₄) (Appels dkk, 2008).
- Menghasilkan endapan lumpur sisa digestasi anaerobik yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kesuburan lahan (Baba dkk., 2013).

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian skala laboratorium sistem *batch* dan skala semi pilot sistem kontinyu yang telah memberikan hasil bahwa teknologi digestasi anaerobik dua tahap efektif untuk mengolah lumpur biologi dari IPAL industri kertas. Hasil dan manfaat yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah dapat mereduksi jumlah lumpur

sebesar 88% dengan kadar padatan meningkat dari 2% menjadi 6% yang berpotensi sebagai pupuk organik. Keuntungan lain adalah selain menghasilkan biogas 1,75 L/g VS dengan kadar $CH_4 > 50\%$, juga produk samping pupuk organik ± 25 kg/g VS.hari (Rina dkk, 2012).

Atas dasar uraian tersebut, telah dikembangkan digestasi anaerobik dua tahap dalam unit instalasi dengan skala lebih besar sebagai model percontohan di industri. Pada penelitian ini percobaan kontinu pengolahan lumpur biologi proses digestasi anaerobik sistem dua tahap telah dilakukan dengan menggunakan reaktor asidifikasi *Continously Stirred Tank with Solid Recycle (Contact Process)* umum disingkat CSTR/SR dan reaktor metanasi *Up Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji efektivitas proses digestasi anaerobik dalam mengolah lumpur IPAL biologi industri kertas. Tulisan ini menyampaikan hasil kinerja pengoperasian unit instalasi digestasi anaerobik lumpur biologi dalam memproduksi biogas. Dengan keunggulan dan manfaat yang diperoleh dari hasil aplikasi ini diharapkan akan mendorong para industri kertas untuk mengaplikasikannya.

BAHAN DAN METODE

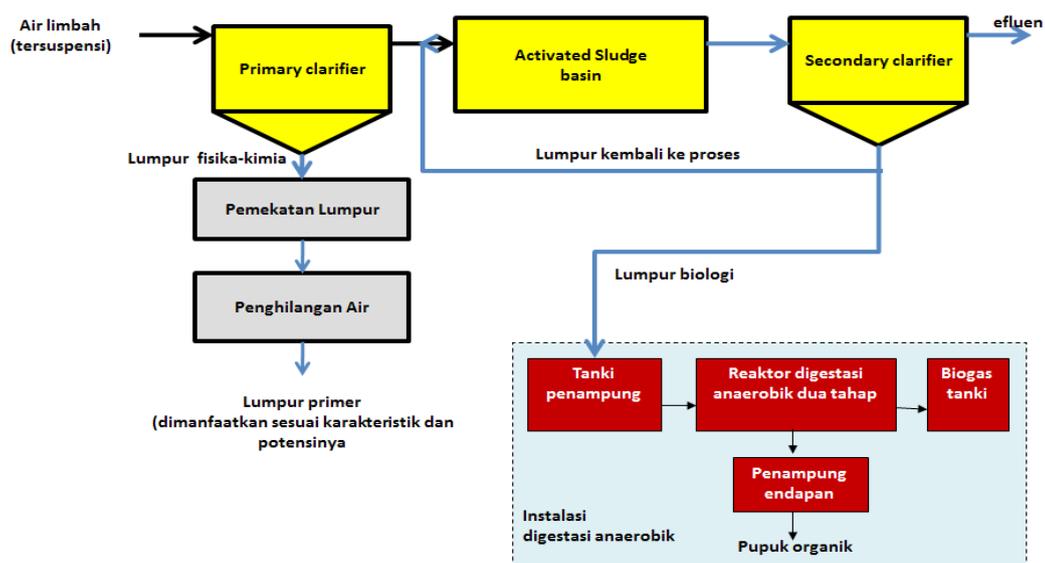
Percobaan dilakukan di industri kertas yang memproduksi kertas dari bahan baku kertas

bekas yang berlokasi di Jawa Barat. Ruang lingkup percobaan meliputi pengadaan starter biomassa mikroba, karakterisasi lumpur IPAL biologi industri kertas, dan percobaan operasional digestasi anaerobik.

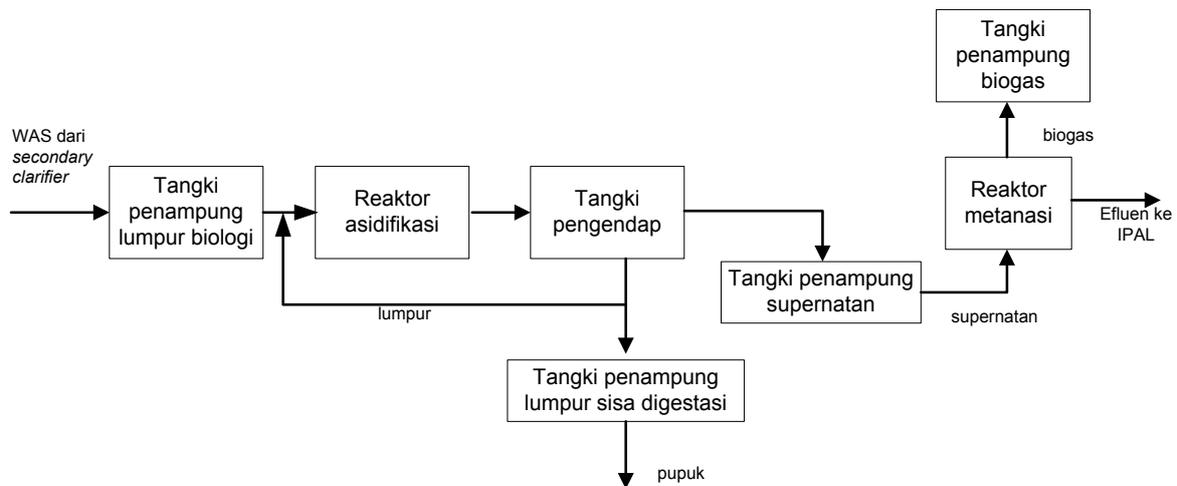
Bahan dan Peralatan

Lumpur IPAL biologi atau *Wasting Activated Sludge (WAS)* yang digunakan pada percobaan ini berasal dari *secondary clarifier* pada sistem pengolahan air limbah pabrik kertas (Gambar 1). Biomassa bakteri asidogen diperoleh dari rumen sapi di Bogor, sedangkan biomassa bakteri metanogen diperoleh dari reaktor anaerobik pada sistem pengolahan air limbah pabrik kertas di Serang. Bahan kimia yang digunakan terdiri dari natrium karbonat (Na_2CO_3) sebagai pH *buffer*, H_2SO_4 untuk mengatur pH dan larutan nutrisi asam fosfat dan urea serta $FeCl_3$ sebagai mikro nutrisi dan flokulan.

Instalasi digestasi anaerobik terdiri dari 2 reaktor utama yaitu reaktor asidifikasi dan reaktor metanasi dilengkapi dengan bak-bak penampung, bak pengendap dan sistem distribusi fluida. Reaktor dibuat dari bahan *stainless steel* dengan tebal ± 5 mm. Diagram alir digestasi anaerobik dapat dilihat pada Gambar 2. Reaktor asidifikasi menggunakan CSTR/SR dengan kapasitas volume efektif $3 m^3$ (diameter = 1,5 m, tinggi = 1,9 m) yang dilengkapi sistem daur ulang lumpur



Gambar 1. Sumber Lumpur IPAL Biologi



Gambar 2. Diagram Alir Instalasi Digestasi Anaerobik

(*sludge recycling*). Pemilihan reaktor ini didasari atas keunggulannya yaitu pencampuran antara lumpur (substrat) dengan mikroba terjadi secara sempurna dan lebih homogen karena adanya sistem pengadukan. Untuk reaktor metanasi telah dikembangkan pengolahan supernatan hasil proses asidifikasi yang berkategori *high-rate* dengan menggunakan reaktor UASB kapasitas 5 m³ (tinggi 5,25 m, panjang = lebar = 1,2 m). Dasar pemilihan reaktor ini adalah dengan aliran vertikal ke atas sehingga terjadi flokulasi biomassa mikroba membentuk granul yang memiliki kemampuan tinggi dalam mendegradasi senyawa organik kompleks serta sistem pemisahan antara biogas dengan partikel dan efluennya. Keunggulan dari sistem dua tahap dengan kombinasi reaktor CSTR/SR dan UASB ini adalah memiliki efisiensi yang tinggi dan dapat dioperasikan pada beban tinggi serta menghasilkan biogas dengan kemurnian (CH₄) tinggi.

Metode Penelitian

Karakterisasi Lumpur IPAL Biologi

Lumpur biologi digunakan sebagai umpan pada reaktor asidifikasi. Sebelum digunakan, dilakukan karakterisasi yang meliputi beberapa parameter yaitu pH, kadar abu, *Total Solids* (TS), *Volatile Solids* (VS), *Total Suspended Solids* (TSS), BOD, COD total (COD_t), COD filtrat (COD_f), Ca, Mg, Pb, Ni, Cr, Zn, Cd,

Ni, Cu. Pengujian dilakukan di Laboratorium Lingkungan Balai Besar Pulp dan Kertas. Metode uji parameter pH, kadar abu, TS, TSS, COD_t, COD_f, Ca, Mg, Pb, Ni, Cr, Zn, Cd, Ni, Cu mengacu pada SNI 2009 sedangkan parameter VS dan BOD mengacu pada APHA Standard Method 2005.

Penyediaan Biomassa Mikroba

Biomassa mikroba yang diperlukan pada proses asidifikasi adalah biomassa mikroba asidifikasi dan biomassa mikroba metanasi, dengan jumlah masing – masing sebanyak 1,5 m³ berdasarkan pada MLSS 0,5 – 1%.

Rancangan Percobaan

Percobaan operasional digestasi anaerobik dilakukan dalam 4 tahap yaitu tahap pengisian reaktor, tahap aklimatisasi biomassa mikroba, tahap peningkatan beban organik dan tahap stabilisasi (*steady state*). Secara keseluruhan percobaan operasional digestasi anaerobik ini dilakukan terhadap lumpur biologi dengan kadar TS berkisar 0,88% - 1,12 %.

a. Tahap Pengisian Reaktor

Operasional Instalasi Digestasi anaerobik diawali dengan pengisian reaktor asidifikasi dan reaktor metanasi. Pengisian awal dilakukan

Tabel 1. Komposisi Umpan pada Reaktor

Reaktor	Komposisi umpan, % v/v			
	Lumpur biologi, (0,88% - 1,12 %)	Molase 1%	Supernatan proses asidifikasi, pH 7	Asam asetat 0,3%
Asidifikasi	50	50	-	-
	75	25	-	-
	90	10	-	-
	100	-	-	-
Metanasi	-	-	50	50
	-	-	75	25
	-	-	90	10
	-	-	100	-

dengan memasukkan starter mikroba sebanyak 1,2 m³ atau 30% v/v dan campuran lumpur biologi (0,88% - 1,12 %) dengan larutan molase 1% (1 :3) v/v ke dalam reaktor CSTR dan tangki pengendap sampai penuh (\pm 2,8 m³). Campuran larutan tersebut dikondisikan pada pH 5,5 dengan asam asetat 0,3%, suhu lingkungan dan dilakukan pengadukan pada putaran agitator 40 RPM. Pada sistem ini dilengkapi pompa untuk mensirkulasi lumpur dari tangki pengendap ke reaktor CSTR, kemudian campuran dibiarkan bereaksi dalam kondisi *batch* selama 5 hari. Setelah proses berlangsung dalam kondisi *batch* selama 5 hari, kemudian campuran lumpur dengan TS (0,88% - 1,12 %) + molase 1% (1:1) v/v dialirkan dengan pompa pada debit 0,75 m³/hari ke dalam reaktor CSTR secara kontinyu selama 4 hari. Supernatan dari *overflow* tangki pengendap ditampung untuk umpan pengisian ke reaktor UASB.

Pengisian awal reaktor metanasi dilakukan dengan cara memasukkan starter mikroba ke reaktor UASB sebanyak 0,75 m³ atau 15% v/v dan campuran supernatan (*overflow* tangki pengendap) + asam asetat 0,3% v/v sampai penuh (\pm 4,25m³). Campuran *starter* mikroba + (supernatan + asam asetat) dalam reaktor UASB dikondisikan pada pH netral (pH 7,0) dengan menambahkan larutan Na₂CO₃, kemudian dibiarkan dalam kondisi *batch* selama 6 hari hingga dilaksanakan proses kontinyu.

b. Tahap Aklimatisasi

Tahap aklimatisasi adalah tahap penyesuaian biomassa mikroba anaerobik dengan umpan lumpur biologi industri kertas, dengan cara memberi umpan yang memiliki senyawa organik sederhana (molase 1%) ditambah limbah lumpur biologi (0,88% -1,12%) dengan komposisi limbah meningkat secara bertahap, pada debit yang sama yaitu 0,75 m³/hari. Supernatan dari proses asidifikasi ditampung untuk digunakan sebagai umpan pada reaktor metanasi. pH lumpur biologi sebagai umpan reaktor asidifikasi diatur pada pH 5,5, sedangkan pH supernatan sebagai umpan metanasi diatur pada pH 6,5 – 7,0. Komposisi umpan masing-masing reaktor dapat dilihat pada Tabel 1.

c. Tahap Peningkatan Beban Organik

Tahap variasi beban organik bertujuan untuk memperoleh kondisi beban tinggi proses digestasi anaerobik secara bertahap, baik dalam reaktor asidifikasi maupun metanasi. Variasi beban organik dilakukan dengan cara meningkatkan debit umpan masing-masing proses dalam reaktor asidifikasi dan reaktor metanasi secara bertahap dengan waktu retensi makin singkat. Variasi beban organik pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Beban Organik dengan Pengaturan Debit Umpan pada Reaktor

Reaktor	Debit (m ³ /hari)	Waktu tinggal (hari)	Lama proses (hari)
Asidifikasi	0,75	4	12
	1	3	12
	1,5	2	14
	3	1	± 30
Metanasi	0,5	8	8
	0,58	6	8
	0,87	4	10
	1,2	3	14
	1,7	2	± 30

Parameter Pengamatan

Pengamatan dan pemantauan proses dilakukan secara intensif dan periodik dengan mengukur beberapa parameter sebagai indikator kinerja proses. Parameter pengamatan dan lokasi pengambilan contoh adalah sebagai berikut:

- a. Pada proses asidifikasi, pengambilan contoh dan parameter uji dilakukan pada inlet (pH, VFA, TS, NH₃, dan VS), outlet (pH, VFA, NH₃, COD_p, COD_f, TSS), lumpur sisa proses digestasi (unsur nutrisi makro-mikro) dan biomassa mikroba dalam reaktor asidifikasi (MLSS).
- b. Pada proses metanasi, pengambilan contoh dan parameter uji dilakukan pada tangki penampung biogas (debit dan komposisi biogas), inlet metanasi (pH, COD_p, COD_f), efluen metanasi (pH, COD_p, COD_f) dan biomassa mikroba dalam reaktor metanasi (MLSS).

Cara pengambilan contoh dan pengawetan untuk masing-masing parameter dilakukan menurut SNI tahun 2009. Pelaksanaan analisis pH dilakukan langsung di lapangan, analisis parameter VFA, COD_p, COD_f, MLSS, NH₃, VS, TSS, dilakukan di Laboratorium Lingkungan BBPK-Bandung, analisis komposisi biogas dilakukan dengan GC di Laboratorium Teknik Kimia – ITB.

Tabel 3. Karakteristik Lumpur IPAL Biologi Industri Kertas

No	Parameter	Satuan	WAS 1	WAS 2	Konsentrasi minimum yang diperlukan**	Konsentrasi inhibition (mg/L)**	Toksisitas, mg/L**
1	pH	-	7,20	7,32			
2	Kadar abu	%	0,77	2,38	-	-	-
3	TS	mg/L	5330	11205	-	-	-
4	VS	mg/L	5202	10938			
5	TSS	mg/L	3420	9070	-	-	-
6	BOD	mg/L	1301	4029	-	-	-
7	CODf	mg/L	626	948,5	-	-	-
8	CODt	mg/L	3866	8917	-	-	-
9	Ca	mg/L	426	570,6	-	2500-7000	-
10	Mg	mg/L	31	101,1	-	1000-2400	-
11	Pb	mg/L	<0,05	0,087	0,02-2,00	8-340	340
12	Ni	mg/L	<0,02	<0,02	0,005-0,5	10-300	30-1000
13	Cr	mg/L	0,07	0,133	0,005-50	8-300	500
14	Cu	mg/L	0,042	0,238	-	5-300	170-300
15	Zn	mg/L	0,252	0,758	-	3-400	250-600
16	Cd	mg/L	0,039	0,051	-	70-600	20-600

Keterangan : * data tidak tersedia

**Sumber : Deublein dan Steinhauser (2008)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lumpur IPAL Biologi Industri Kertas

Sistem pengolahan air limbah industri kertas, umumnya dilengkapi dengan sistem biologi proses *activated sludge*. Untuk menjaga stabilitas prosesnya, maka dilakukan pengeluran *Waste Activated Sludge* (WAS) atau lumpur biologi secara kontinyu. Karakteristik lumpur biologi yang digunakan dalam percobaan ini adalah kadar padatan (TS) sangat rendah sekitar 0,53% – 1,1% dengan pH netral sekitar 7,20 – 7,32 dan komponen utamanya adalah senyawa organik yang diketahui dari kadar abu yang sangat rendah yaitu hanya 0,77% - 2,38% (Tabel 3). *Sludge* dari IPAL proses biologi umumnya merupakan limbah yang bersifat *voluminous* dengan komponen utama biomassa sel mikroba yang mengandung protein 22-52%, lignin 20-58%, karbohidrat 0-23%, lipid 2-10%, dan selulosa 2-8% (Rina dkk., 2012).

Rasio BOD terhadap COD_t sekisar 0,3 – 0,5 yang artinya bahan organik yang terkandung di dalamnya relatif sederhana. Lumpur biologi mengandung logam Pb, Ni, Cr yang cukup rendah dan dapat berfungsi sebagai mikronutrisi, selain itu juga mengandung Ca dan Mg yang dapat berfungsi sebagai makronutrisi dalam proses digestasi anaerobik namun masih di bawah konsentrasi *inhibition*. Pada konsentrasi moderat, ion-ion logam ringan (Ca, Mg) merangsang pertumbuhan mikroba, namun pada jumlah yang berlebihan memperlambat pertumbuhan mikroba, dan pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan *inhibition* atau toksisitas (Chen dkk., 2008). Konsentrasi logam berat (Pb, Ni, Cr, Cu, Zn dan Cd) dalam lumpur tersebut masih di bawah konsentrasi *inhibition* dan toksisitas sehingga tidak menghambat proses digestasi anaerobik. Logam berat bersifat tidak *biodegradable* dan dapat terakumulasi sampai konsentrasi yang berpotensi toksik. Toksisitas logam berat merupakan salah satu penyebab utama kegagalan digester. Logam berat dapat bersifat stimulator atau inhibitor tergantung dari konsentrasi logam, bentuk kimia logam dan kondisi proses seperti pH dan potensial redoks. Umumnya bakteri asidogenik lebih resisten terhadap logam berat dibandingkan bakteri metanogenik (Chen dkk., 2008).

Hasil Uji Coba Percobaan Operasional Instalasi Digestasi Anaerobik

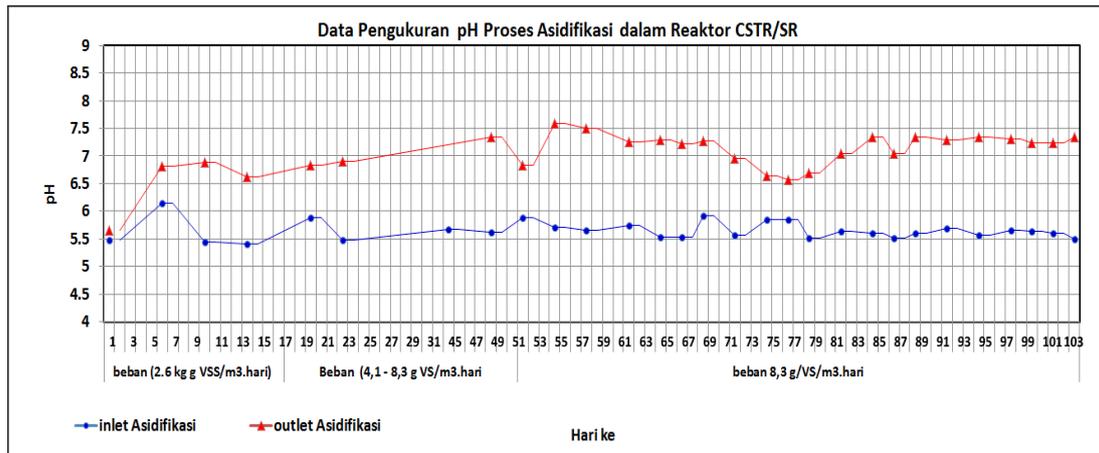
1. Proses Asidogenesis

Proses asidogenesis merupakan penguraian bahan organik melalui pemecahan sel mikroba yang merupakan komponen terbesar dalam limbah lumpur biologi. Pecahnya sel mikroba tersebut menyebabkan lepasnya bahan organik dari sel dan terurai menjadi lebih sederhana yang merupakan substrat bagi mikroba asidogenesis. Terurainya bahan organik tersebut dapat tampak dari meningkatnya parameter VFA, COD terlarut dan menurunnya kadar TS yang terkandung dalam supernatan, serta ditunjukkan pula dari parameter pH yang cenderung menurun. Menurut Monnet (2003), asam asetat, laktat dan propionat terbentuk selama proses asidogenesis sehingga nilai pH turun, sedangkan menurut Seadi dkk. (2008) akumulasi VFA juga akan menurunkan nilai pH.

Proses asidogenesis dioperasikan dengan aliran umpan diatur sesuai dengan perlakuan waktu retensi yang ditetapkan mulai dari awal 4 hari kemudian diturunkan bertahap 3 hari, 2 hari sampai mencapai 1 hari. Keluaran hasil proses asidifikasi berupa cairan yang banyak mengandung VFA. Karakteristik cairan keluaran proses asidifikasi tersebut mengandung COD_t berkisar antara 3020 mg/L – 8641 mg/L dengan nilai rata-rata 6796 mg/L dan COD_f berkisar antara 27 mg/L – 6418 mg/L dengan nilai rata-rata 5095 mg/L, TSS berkisar antara 165 mg/L – 420 mg/L dengan nilai rata-rata 236 mg/L, dan pH sekitar 6 – 7.

Dalam reaktor asidifikasi CSTR terjadi proses hidrolisis oleh aktivitas bakteri hidrolitik dan proses fermentasi dalam kondisi anaerobik oleh bakteri asidogenik. Hasil biokonversi dari bahan-bahan organik yang terkandung dalam lumpur terutama adalah asam organik yang diikuti oleh pelepasan gas gas seperti H_2 , H_2S , CO_2 dan NH_3 yang pada akhirnya dapat diindikasikan dari perubahan nilai pH cairan/supernatan hasil keluaran reaktor CSTR. Gambar 3 menunjukkan kurva pH supernatan (*outlet*) meningkat cukup tajam berkisar pada pH 6,5-7,5 dibandingkan *inlet* yang berada pada pH 5,5-6,0.

Kenaikan pH mengindikasikan terbentuknya amonia cukup tinggi dan lebih dominan dibandingkan pembentukan asam organik. Amonia yang terbentuk berasal dari hasil



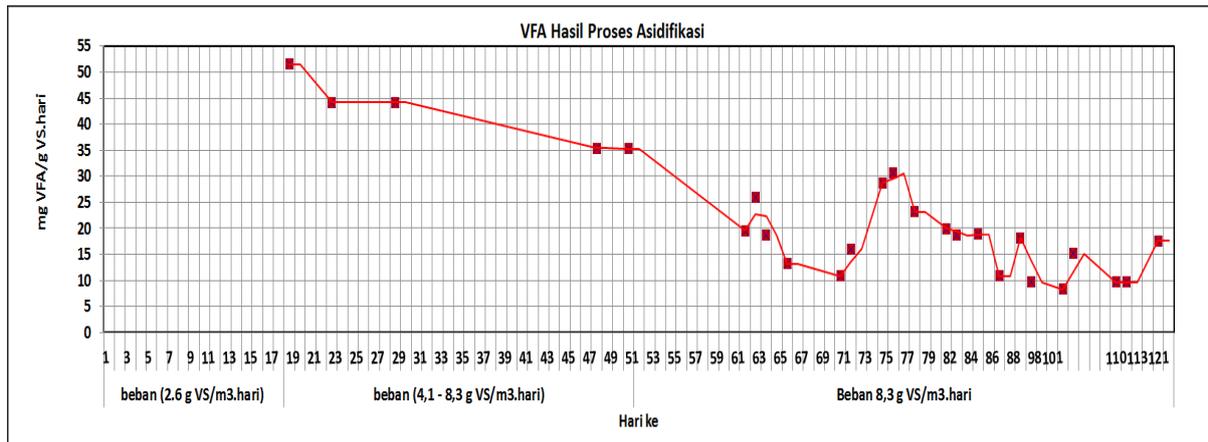
Gambar 3. pH pada proses asidifikasi dalam reaktor CSTR/SR

penguraian senyawa amino (protein) yang merupakan komponen substrat yang dominan terkandung dalam lumpur IPAL biologi (Monnet, 2003). Tingginya pelepasan amonia dari hasil biodegradasi menunjukkan pula tingginya kandungan nutrisi nitrogen yang berasal dari lumpur yang terbawa dari IPAL. Hasil analisis amonia pada umpan proses asidifikasi dan hasil olahannya dapat dilihat pada Tabel 5. Dari hasil analisis amonia terlihat bahwa nilai *inlet* asidifikasi dan *outlet* asidifikasi cenderung berada di bawah 200 mg/L. Konsentrasi amonia di bawah 200 mg/L bermanfaat bagi proses anaerobik karena nitrogen merupakan nutrisi penting untuk mikroorganisme anaerobik. Pengendalian pH optimum dalam pertumbuhan mikroorganisme dapat mengurangi toksisitas amonia. Ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} merupakan antagonis terhadap *inhibition* amonia. Amonia termasuk senyawa inhibitor yang umum terdapat pada digestasi anaerobik (Chen dkk., 2008). Menurut Suryawanshi dkk. (2013), toksisitas amonia dimulai dari 1.500 mg/L dan beracun pada konsentrasi 3.000 mg/L.

Tabel 5. Data Analisis Amonia pada Proses Asidifikasi

Hari ke	Inlet Asidifikasi (mg/L)	Outlet asidifikasi (mg/L)
9	32,2	75,74
15	25,2	84,1
50	25,2	93,03
60	30,57	54,22
64	23,2	53,39

Terbentuknya VFA sebagai hasil dari biokonversi dalam proses asidogenesis dapat diketahui dari meningkatnya kadar VFA pada keluaran asidifikasi yang berupa cairan filtrat atau supernatan. Pengoperasian reaktor CSTR dengan variasi beban meningkat dari 2,6 g VS/ m³.hari ke 8,3 g VS/m³.hari menghasilkan VFA yang berfluktuasi pada kisaran 8,36 mg VFA/ g VS.hari – 51,51 mg VFA/ g VS.hari. Produksi VFA cenderung menurun sejalan dengan meningkatnya beban organik (Gambar 4). Hal tersebut terjadi karena singkatnya waktu yang diberikan terhadap operasional masing-masing beban organik. Idealnya peningkatan beban dilakukan setelah produksi VFA kembali relatif sama dengan produksi pada beban sebelumnya. Gambar 4 menunjukkan bahwa dengan kenaikan beban dari 2,6 g VS/m³.hari menjadi 8,3 g VS/ m³.hari secara bertahap telah menurunkan laju pembentukan VFA. Penurunan VFA tersebut, sejalan dengan perlakuan mempersingkat waktu retensi, yang berarti memperbesar debit umpan masuk limbah lumpur biologi, maka laju beban organik sebagai kondisi proses asidifikasi menjadi makin besar. Pada umumnya, konsekuensi dari operasi pada beban tinggi adalah akan menurunnya efisiensi proses bila tidak diimbangi dengan meningkatnya aktivitas mikroba pada sistem tersebut. Namun pada proses kontinyu, makin lama waktu operasi akan makin teraklimatisasi kehidupan mikroba, sehingga laju pembentukan VFA menjadi stabil. Pada pengoperasian reaktor dengan waktu retensi 2 hari atau pada beban 6,21 g VS/ m³.hari menghasilkan VFA rata-rata 35,33 (35,28 – 35,39) mg/ g VS.hari, sedangkan pada waktu retensi 1 hari atau pada 8,3 g VS/ m³.hari



Gambar 4. VFA Hasil Proses Asidifikasi Lumpur Biologi dalam Reaktor CSTR/SR

menghasilkan VFA rata-rata 17,3 (8,36 – 30,59) mg/g VS.hari yang masih rendah. Atas dasar data tersebut, pengoperasian reaktor asidifikasi pada waktu retensi 1 hari masih memerlukan waktu untuk dapat mencapai kadar VFA yang sama dengan pada waktu retensi 2 hari. Lain halnya dengan VFA yang terbentuk pada tahap aklimatisasi menunjukkan nilai rata-rata cukup tinggi yaitu 46,6 (44,14 – 51,51) mg/g VS.hari, disebabkan adanya penambahan asetat 0,3% untuk adaptasi mikroba asidogenik terhadap umpan lumpur IPAL biologi.

Hasil percobaan yang dilakukan oleh Asaadi (2008) menjelaskan bahwa terbentuknya VFA pada proses asidifikasi lumpur rata-rata 18 mg VFA/g VS. hari dan menurut Yunqin dkk., (2009) adalah 36 – 62 mg VFA/g VS.hari. Membandingkan dengan data produksi VFA hasil penelitian Asaadi (2008) dan Yunqin dkk. (2009) tersebut, menunjukkan bahwa sampai beban 4,1 g VS/m³.hari menghasilkan VFA yang masuk dalam kisaran VFA hasil penelitian Yu dan Fang (2001) dan lebih tinggi dari hasil penelitian Asaadi (2008). Namun pada beban 8,3 g VS/m³.hari menunjukkan produksi VFA yang masih rendah dan lebih rendah dari penelitian Asaadi, 2008. Untuk dapat meningkatkan produksi VFA memerlukan waktu lebih lama, karena operasional reaktor kontinyu dibandingkan reaktor batch adalah makin lama perioda pengoperasian, akan makin teraklimatisasi kehidupan mikroba yang akhirnya berpengaruh kepada aktivitas dan stabilitas proses. Kinerja proses asidifikasi dapat ditingkatkan lagi apabila fluktuasi kadar padatan (TS) lumpur dan debit aliran dapat diminimalisasikan. Selain itu pengkondisian

reaktor pada suhu termofilik (50 – 55°C) dapat meningkatkan laju reaksi proses hidrolisis-asidifikasi sehingga pembentukan VFA menjadi meningkat.

Proses asidifikasi, selain menghasilkan filtrat yang mengandung VFA dengan konsentrasi tinggi, juga menghasilkan residu lumpur sisa proses asidifikasi. Residu lumpur tersebut mengandung komponen-komponen yang sesuai dengan persyaratan pupuk organik dari Instalasi Pengelolaan Air Limbah Industri menurut KEMANTAN No. 11/2011. Hasil analisis residu sisa proses asidifikasi dan perkiraan kualitas pupuk organik setelah pemekatan dapat dilihat pada Tabel 6.

Data analisis tersebut menunjukkan bahwa kadar air residu sisa lumpur sangat tinggi jauh di atas persyaratan baku mutu pupuk organik. Tingginya kadar air tersebut menyebabkan komponen-komponen unsur hara makro dan C organik menjadi rendah. Dengan perlakuan pemekatan dan penghilangan air untuk mencapai kadar padatan minimal 75%, diperkirakan residu sisa lumpur tersebut berpotensi untuk dijadikan pupuk organik. Perkiraan kualitas pupuk organik setelah mengalami perlakuan pemekatan dan penghilangan air untuk mencapai kadar air 25% hampir semua parameter masuk dalam persyaratan pupuk organik, kecuali nilai C/N dan nilai Fe yang sedikit di atas nilai maksimum persyaratan. Tingginya Fe bukan berasal dari proses industri kertas tetapi dari perlakuan penambahan FeCl₃ pada proses digestasi anaerobik. Penambahan FeCl₃ ini hanya diperlukan bila kondisi termofilik pada reaktor asidifikasi tidak dapat terpenuhi. Fungsi utama penambahan FeCl₃ adalah sebagai

Tabel 6. Unsur Hara dalam Residu Sisa Lumpur Digestasi

No	Parameter	Satuan	Nilai Uji	Perkiraan nilai setelah dipekatkan	Persyaratan Pupuk Organik *)
1	pH H ₂ O	-	6,85	6,85	4 – 9
2	Kadar air	%	72,89	25	15 – 25
3	C-organik	%	7,40	21,58	min. 15
4	C/N	%	10	29,16	15 – 25
5	N-total	%	0,77	2,25	-
6	P ₂ O ₅	%	0,60	1,75	-
7	K ₂ O	%	0,20	0,58	-
8	Hara makro (N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	%	1,57	4,58	min. 4
9	Na	%	0,03	0,09	maks. 2000
10	Cl	%	0,09	0,26	maks. 5000
11	Fe	ppm	3145	9170	maks. 9000
12	Mn	ppm	211	615	maks. 5000
13	Cu	ppm	19	55,40	maks. 5000
14	Zn	ppm	45	131,20	maks. 5000
15	Pb	ppm	14,43	42,07	maks. 50

*) menurut PERMENTAN No 11/2011

flokulan agar sifat lumpur biomassa tidak terflotasi dan terbawa bersama aliran supernatan masuk ke reaktor metanasi. Walaupun nilai C/N sedikit diatas persyaratan nilai maksimum, namun nilai C organiknya memenuhi persyaratan pupuk organik sedangkan persyaratan N total tidak ada, sehingga untuk menurunkan nilai C/N agar memenuhi persyaratan dapat dilakukan dengan menurunkan nilai C organikya yaitu dengan meningkatkan waktu retensi di reaktor asidifikasi, namun hal tersebut akan meningkatkan biaya operasional. Cara lain yang dapat dilakukan yaitu meningkatkan nilai N dengan cara menambahkan nitrogen ke residu lumpur, mengingat tidak ada persyaratan maksimum hara makro (N+P₂O₅+K₂O) dalam pupuk organik.

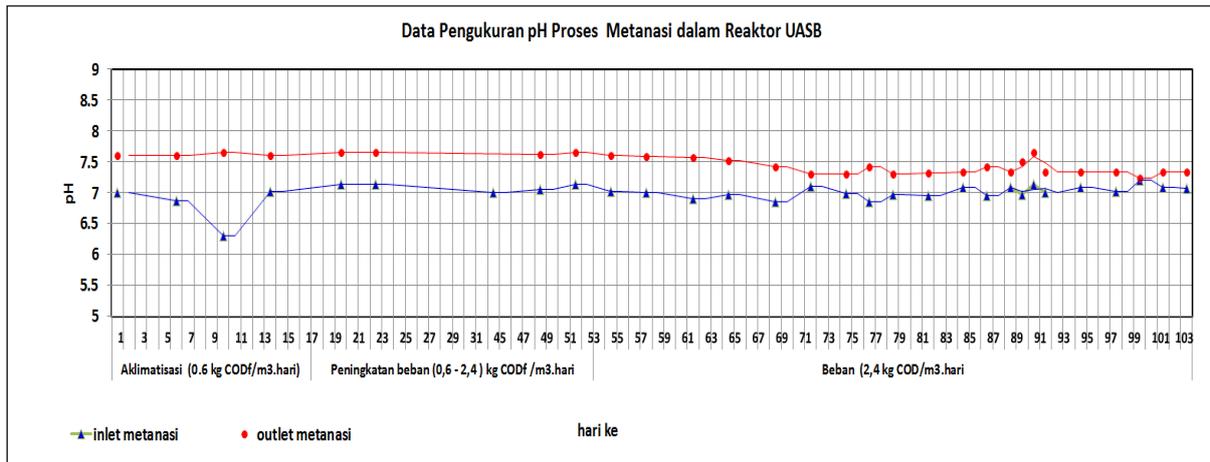
Proses Metanasi

Proses kontinyu metanasi merupakan proses lanjutan dari proses asidifikasi dengan umpan cairan filtrat atau supernatan hasil proses asidifikasi. Uji coba aplikasi proses metanasi dilakukan di dalam reaktor UASB kapasitas 5 m³. Tipe reaktor anaerobik UASB ini banyak digunakan untuk mengolah air limbah beban organik tinggi pada industri pulp dan kertas (Appels dkk., 2008). Keberhasilan proses metanogenesis tergantung pada aktivitas mikroba

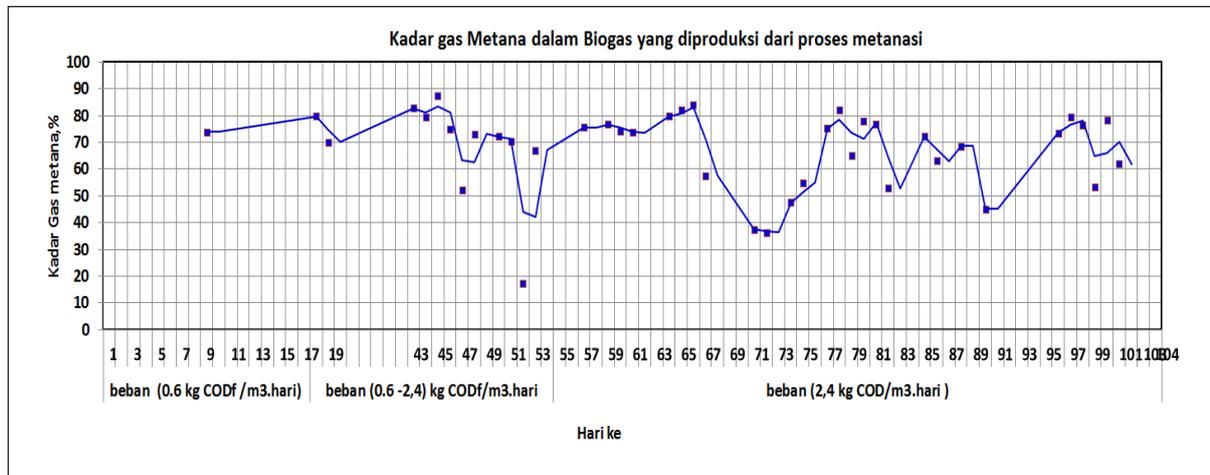
metanogenesis dalam merubah asam asetat menjadi gas CH₄ dan gas CO₂ (Solera dkk., 2002).

Umpan yang diperoleh dari supernatan hasil proses diberi perlakuan untuk mengatur pH pada kisaran pH 7,0 – 7,2 dengan cara menambahkan NaOH dan Na₂CO₃. Cairan umpan untuk proses metanasi tersebut dialirkan ke dalam reaktor UASB dengan pompa sesuai dengan perlakuan waktu retensi yang ditetapkan mulai dari awal 8 hari kemudian diturunkan bertahap 6 hari, 4 hari, 3 hari sampai mencapai 2 hari. Jumlah biomassa mikroba dalam reaktor UASB adalah 15% v/v dengan VS sekitar 1%. Proses metanasi merupakan proses penguraian asam organik volatil (VFA) yang berupa asam asetat menjadi gas metana dan CO₂ oleh bakteri anaerobik obligat.

Pada tahap *start-up*, ke dalam reaktor UASB dimasukkan biomassa mikroba metanogenik sebanyak 15% v/v atau 0,75 m³. Umpan yang digunakan adalah supernatan dari hasil proses asidogenesis yang telah ditampung terlebih dahulu di dalam tangki umpan reaktor UASB dan dinetralkan pH nya pada kisaran 7,0–7,2. Karakteristik umpan proses metanasi adalah pH rata-rata 6,98 (6,31–7,14), COD terlarut rata-rata 1129 (2433 - 828) mg/L. Ke dalam umpan tersebut ditambahkan NaHCO₃ konsentrasi 20% sebanyak 0,2–1,0 liter per m³ umpan



Gambar 5. pH pada proses metanasi dalam reaktor UASB



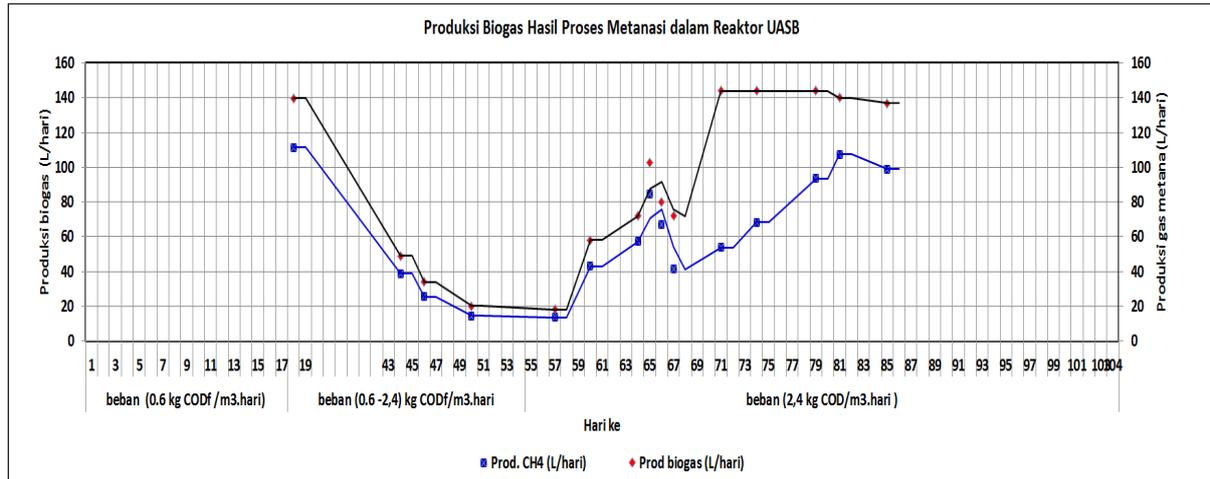
Gambar 6. Kadar Metana dalam Biogas Hasil Proses Metanasi

yang berfungsi sebagai *buffer* untuk mencegah terjadinya perubahan pH yang rendah. Makronutrisi sebagai sumber P dari H_3PO_4 ditambahkan ke dalam umpan sebanyak 300 mL/m³ atau berdasarkan perbandingan COD : P = 350 : 1.

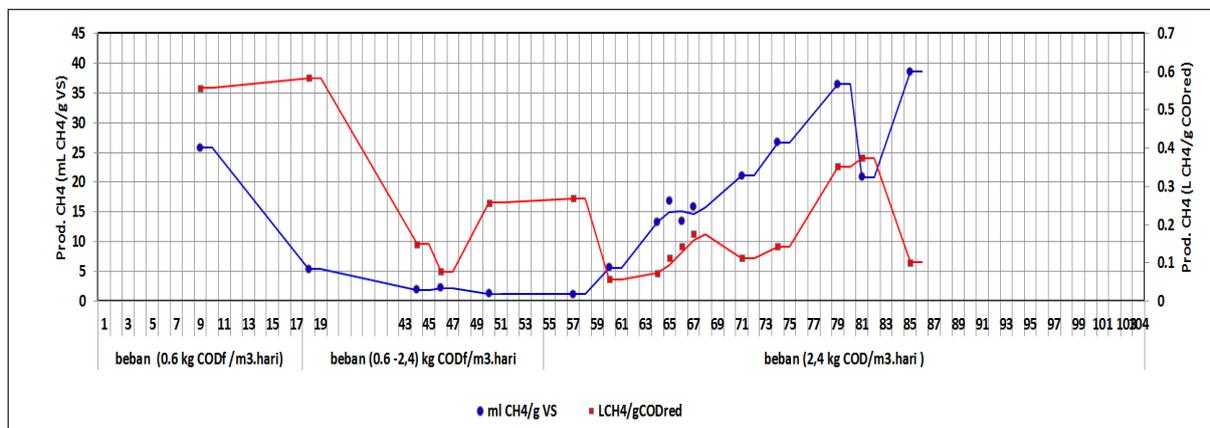
Pada proses metanogenesis ini, VFA yang terbentuk pada tahap asidogenesis khususnya asam asetat akan diurai menjadi gas metana (CH_4) dan CO_2 oleh bakteri metanogenik pada kondisi anaerobik obligat. Keberhasilan proses metanogenesis dapat diketahui dari tereduksinya COD_f dan tingginya gas metana yang dihasilkan. pH umpan proses metanasi merupakan keluaran dari proses asidifikasi yang telah diatur pH-nya pada pH optimum. Gambar 5 menunjukkan pH umpan metanasi rata-rata 6,98 (6,31 – 7,14) dan menghasilkan efluen dengan pH rata-rata 7,5 (7,3 – 7,66). Adanya sedikit peningkatan pH

tersebut kemungkinan merupakan salah satu indikasi masih terbentuknya amonia sebagai sisa hasil penguraian senyawa asam organik yang mengandung nitrogen yang berasal dari lumpur biologi.

Percobaan metanasi berlangsung pada beban organik 0,6–2,4 kg COD_f/m^3 .hari dengan waktu retensi 8 hari dipersingkat sampai 2,5 hari, dengan lama percobaan selama 70 hari. Keberhasilan proses metanasi dapat diketahui dari terbentuknya biogas dengan komponen utamanya metana. Keberhasilan penelitian ini tampak dari kadar metana yang tinggi (Gambar 6). Walaupun kadar metana tampak berfluktuasi, namun cenderung tinggi dengan nilai rata-rata 68,85% dari kisaran 17,30 – 87,34% pada beban 0,6 – 2,4 kg COD_f/m^3 .hari dan meningkat setelah proses cenderung stabil pada beban 2,4 kg COD_f/m^3 .hari dengan nilai rata-rata 67,19% dari kisaran



Gambar 7. Produksi biogas Hasil Proses Metanasi pada Reaktor UASB



Gambar 8. Produksi Metana Hasil Proses Metanasi pada Reaktor UASB

36,30%–84,03% (Gambar 6). Kadar metana tersebut masuk dalam kisaran kadar metana yang berasal dari kotoran ternak yaitu 60% – 70% CH₄ (Angelidaki dkk., 2003), sedangkan menurut Wood (2008), umumnya kadar metana yang dihasilkan dari proses digestasi anaerobik berkisar antara 55% – 75%. Kadar metana pada beban 2,4 kg COD_f/m³.hari tersebut cenderung berfluktuasi walaupun prosesnya sudah stabil. Hal tersebut dikarenakan kandungan VFA pada *inlet* yang dihasilkan pada tahap asidifikasi juga berfluktuasi (Gambar 4). Gambar 7 menunjukkan produksi biogas dan gas metana yang pada tahap aklimatisasi tinggi, sejalan dengan peningkatan beban dari 0,6 kg COD_f/m³.hari menjadi 2,4 kg COD_f/m³.hari mengalami penurunan, yang kemudian berangsur-angsur meningkat kembali pada beban 2,4 kg COD_f/m³.hari. Produksi gas metana rata-rata pada beban 0,6–2,4 kg COD_f/m³

adalah 47,5 L/hari dengan kisaran 14,4 – 111,3 L/hari, sedangkan pada beban 2,4 kg COD_f/m³.hari adalah 66,3 L/hari dengan kisaran 13,6 – 107,3 L/hari. Meningkatnya kembali produksi biogas/metana, disebabkan terjadinya proses adaptasi mikroba metanogenik terhadap umpan filtrat proses asidifikasi (Rina dkk, 2011).

Proses metanasi dalam reaktor UASB secara-berangsur-angsur dapat meningkatkan kinerja menjadi lebih baik. Peningkatan tersebut dapat diketahui juga dari menurunnya zat pencemar yaitu COD_t rata-rata sebesar 51,2% dari kisaran 12,5% – 83,1%, dengan konsentrasi efluen COD_f rata-rata 210,1 mg/L dari kisaran 112,9 mg/L – 583,9 mg/L dan COD total rata-rata 375,2 mg/L dari kisaran 238,3 mg/L – 740,6 mg/L. Perhitungan biokonversi gas metana terhadap COD_f yang tereduksi dan VS lumpur IPAL biologi dapat dilihat pada Gambar 8.

Pada beban 2,4 kg COD/m³.hari, proses metanasi dalam reaktor UASB menghasilkan gas metana rata-rata 0,17 L CH₄/g COD_{red} dari kisaran 0,1 – 0,35 L CH₄/g COD_{red}. Produksi gas metana dari proses digestasi anaerobik ini masih berfluktuasi yaitu sekitar 49 (29 – 100)% dari perhitungan teoritis 0,35 L/g COD_{red}. Masih rendahnya produksi biogas tersebut kemungkinan disebabkan oleh perlakuan lama peningkatan beban per satu kondisi terlalu singkat, sehingga aktivitas biomassa mikroba berfluktuasi. Selain itu juga dapat disebabkan oleh fluktuasinya kualitas dan kuantitas umpan (*feeding*). Perhitungan produksi biogas berdasarkan VS umpan diperoleh nilai rata-rata 19,06 mL CH₄/g VS dari kisaran 1,19 – 38,52 mL CH₄/g VS. Produksi biogas tersebut masih dapat ditingkatkan, apabila dilakukan proses digestasi lumpur dilakukan pada suhu 55°C akan menghasilkan 50 – 100 mL CH₄/g VS (Bayr dkk., 2013).

KESIMPULAN

Lumpur IPAL biologi industri kertas keluaran unit *clarifier* sebagai WAS memiliki pH netral (7,20 – 7,32), TS sekitar 0,53% – 1,1% dengan komponen utama adalah senyawa organik sekitar 97%. Ratio BOD terhadap nilai COD_t berkisar 0,3 – 0,5 dengan COD_t 3866 – 8917 mg/L dan nilai COD_f sekitar 626 – 948,5 mg/L, dan mengandung logam-logam berat yang cukup rendah. Karakteristik limbah lumpur biologi berpotensi untuk diolah dengan proses digestasi anaerobik. Kondisi operasi proses asidogenesis diatur pada pH sekitar 5,5-6,0, sedangkan kondisi operasi proses metanogenesis pada pH sekitar 6,31 – 7,14 yang masing-masing berlangsung pada suhu mesofilik sekitar 24 – 29°C. Pada pengoperasian reaktor asidifikasi CSTR dengan waktu retensi 1 hari dan beban organik 8,3 g VS/m³.hari dapat menghasilkan VFA rata-rata 17,3 mg/g VS.hari dari kisaran 8,36 – 30,59 mg/g VS.hari. Pada beban organik 2,4 g COD/m³.hari dan waktu retensi 2,5 hari, proses metanasi dalam reaktor UASB dapat menghasilkan biogas rata-rata 66,3 L/hari dengan kadar metana rata-rata 67,19%. Gas metana yang terbentuk rata-rata 0,17 L CH₄/g COD_{red} atau 19,06 mL CH₄/g VS. Selain itu proses metanasi dapat menurunkan COD_f rata-rata 51,2%, dengan konsentrasi efluen COD_f rata-rata 210,1 mg/L dan COD total rata-rata 375,2 mg/L.

UCAPAN TERIMA KASIH

2. Kepala BPKIMI Kementerian Perindustrian yang telah mendanai riset ini melalui anggaran DIPA BPKIMI TA 2013.
3. Pimpinan PT SWEN dan PT IKPP Serang yang telah bekerja sama dalam penyediaan biomassa mikroba.
4. Pimpinan PT Papertech - Indonesia yang telah bekerjasama dalam pelaksanaan penelitian ini.
5. Rekan rekan kerja saudara Prima Besty Asthary, Saepulloh, Yoveni Yanimar, Hendro Risdianto, dan Wachyudin Aziz yang telah turut serta berpartisipasi dalam pelaksanaan riset ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Angelidaki, I, Ellegaard L., Ahring, B.K. 2003. Applications of the anaerobic digestion process - In : *Ahring B.K. Biomethanation II*, pp. 1 -30. Berlin Heidelberg : Springer – Verlag
- Appels, L., Bayens, J., Degreve, J., Dewil, R. 2008. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 755-781
- Asaadi, M., 2008. Review of the performance of an advanced digestion process. In: *13th European Biosolids and Organic Resources Conference and Workshop*, November 10–12, Lancashire, UK
- Baba, Y., Tada, C., Watanabe, R., Fukuda, Y., Chida, N., 2013. Anaerobic Digestion of Crude Glycerol from Biodiesel Manufacturing Using a Large Scale Pilot Plant: Methane Production and Application of Digested Sludge as Fertilizer. *Bioresource Technology*, 140, 342-348
- Bayr, S., Kaparaju, P., Rintala, J., 2013. Screening Pretreatment Methods to Enhance Thermophilic Anaerobic Digestion of Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment Secondary Sludge. *Chemical Engineering Journal* 223 (2013), 479-486
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process. A review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064

- Deublein, D., Steinhauser, A., 2008, *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- Karlsson, A., Truong, X. B., Gustavsson, J., Svensson, B.H., Nilsson, F., Ejlertsson, J., 2011. Anaerobic treatment of activated sludge from Swedish pulp and paper mills – biogas production potential and limitations. *Environmental Technology*, 32 (14), 1559-1571
- Mahmood, T., Elliott, A., 2006, A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry, *Water Res.*, 40, 2093–2112
- Monnet, F. 2003. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *Final Report*. Remade Scotland
- Polprasert, C., 1989, *Organic Waste Recycling*, New York, John Willey & Son, Hal. 105 – 144
- Rina, S. S, Purwati, S., Setiawan, Y., Wardhana, K. A., 2011, Efektivitas Proses Kontinyu Digestasi Anaerobik Dua Tahap pada Pengolahan Lumpur Biologi Industri Kertas. *Jurnal Riset Industri*, Vol V, No.2, 131 – 142.
- Rina, S.S., Purwati, S., Setiawan, Y., Wardhana, K.A., 2012. Pengembangan Proses Digestasi Anaerobik Lumpur Biologi IPAL Industri Kertas untuk Meningkatkan Nilai Ekonomi Pemanfaatan Limbah. *Jurnal Riset Industri*, Vol VI, No. 2, 77 – 86
- Seadi, T.A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. 2008. *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10,DK-6700 Esbjerg, Denmark
- Solera. R; L. Romero; D. Sales., 2002, The Evolution of Biomass in a Two-Phase Anaerobic Treatment Process During Start-Up. *Chem. Biochem. Eng. Q.* Vol. 16 No. 1. 25-29
- Suryawanshi P. C., Chaudhari A.B., Bhardwaj S., Yeole, T.Y. 2013. Operating Procedures for Efficient Anaerobic Digester Operation. *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences*. Vol. 1(2), 12-15
- Wood, N. 2008. "Pretreatment of Pulp Mill Wastewater Treatment Residues To Improve Their Anaerobic Digestion". *Tesis*, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. University of Toronto
- Yunqin, L., Dehan, W., Shaoquan, W., Chunmin W. 2009. Alkali Pretreatment Enhances Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Pulp and Paper Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 170, 366-373
- Yu, H. Q., Fang, H. H. P., 2001. Production of Volatile Fatty Acids and Alcohols from Dairy processing wastewater in the thermophilic conditions. *Transaction of ASAE*. 44 (5), 1357 – 1361