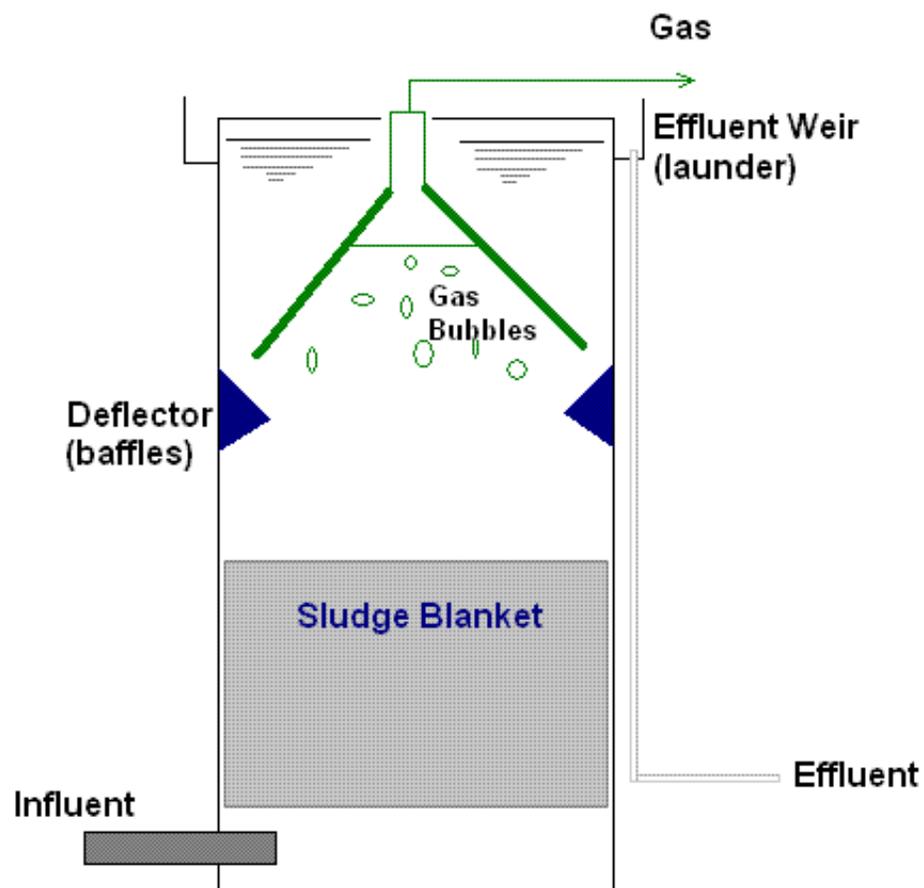


BIOGAS : POTENSI DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU



Penulis

Mahmud Hasan

-mahmudzone-

DAFTAR ISI

I. PENDAHULUAN

- A. Latar Belakang
- B. Ringkasan

II. Mengenal Lebih Jauh Tentang Tahu, Limbah dan Potensinya

- A. Tahu
- B. B. Limbah Industri Tahu
- C. Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu

III. PENGENDALIAN LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU

- A. Pengendalian Limbah Cair Tahu dengan Sistem Anaerobik
- B. Proses Transformasi Bahan Organik
- C. Mikrobia dalam Pengolahan Limbah Cair Tahu

IV. POTENSI LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU

- A. Potensi Limbah Cair Industri Tahu Sebagai Sumber Energi Alternatif Biogas
- B. Reaktor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

DAFTAR PUSTAKA

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industri tahu merupakan industri pangan yang populer di masyarakat, bahan bakunya banyak dijumpai, pengolahannya mudah, bergizi, dan harganya terjangkau. Dampak positif industri tahu yang lain adalah terserapnya tenaga kerja, terpenuhinya gizi masyarakat, dan peningkatan pendapatan masyarakat. Namun demikian, muncul pula dampak negatif yaitu polusi lingkungan karena limbah tahu yang kaya bahan organik dan potensial terjadi degradasi secara alami.

Menurut Rahardjo dalam Trismilah *et al* (2001) limbah cair dari tahu mengandung bahan organik dan nutrien tinggi yang terdiri dari air 90,72 %, protein 1,8%, lemak 1,2%, serat kasar 7,36%, dan abu 0,32 %. Limbah cair dari tahu yang paling berbahaya apabila dibuang secara langsung ke lingkungan adalah *whey* yang merupakan hasil samping proses penggumpalan dan kandungan bahan organiknya sangat tinggi (Suryandono, 2004).

Dengan melihat komposisi limbah tersebut, maka sistem anaerobik sangat tepat untuk mengolah limbah cair tahu. Pengolahan langsung dengan

aerobik menghadapi banyak kendala seperti timbulnya busa dan banyaknya bahan organik yang tidak terdegradasi (Anwar, 2005)

Produk samping dari pengolahan limbah yang kaya bahan organik secara anaerobik adalah munculnya biogas akibat aktivitas mikrobia dalam reaktor pengolah limbah. Biogas adalah gas mudah terbakar yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob. Kandungan biogas didominasi oleh CH_4 (gas metana) yang berpotensi besar sebagai sumber energi untuk memasak, pemanasan atau dikonversi menjadi listrik.

Pengolahan limbah secara anaerobik dapat berfungsi ganda, yaitu sebagai pengolah limbah dan sekaligus penghasil sumber energi berupa biogas sehingga diperlukan sosialisasi lebih lanjut tentang potensi tersebut dengan menggunakan reaktor yang efisien dan efektif serta mudah digunakan. Pengaplikasian teknologi ini dalam industri diharapkan dapat mengurangi biaya produksi. Lebih-lebih di saat mahalnnya BBM dan tidak tersedianya bahan bakar penggantinya, maka biogas ini bisa menjadi salah satu alternatif yang bisa dipilih untuk mendukung proses produksi.

Banyak model reaktor yang telah digunakan untuk mengolah limbah organik secara anaerob untuk menghasilkan biogas, diantaranya adalah

Batch Digester, Fixed Dome (Chinese) Digester, Floating Dome (Indian) Digester, Beg-Red Mud (Taiwan, China) Digester, Plug Flow Digester, anaerobic Filter, Anaerobic Baffled Reactor (ABR), Anaerobic Contact Digester, dan Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB).

Pengolahan limbah cair tahu dengan ABR menunjukkan bahwa degradasi bahan organik dapat mencapai 91,78 %, sehingga COD keluaran ABR berkisar antara 400-700 mg/L (Wagiman, 2003). Oleh karena itu perlu dicari alternatif lain yang lebih baik dalam pengolahan limbah cair tahu ini.

UASB sebagai salah satu digester anaerobik telah banyak dikenal dan diaplikasikan di berbagai belahan dunia sejak Lettinga memperkenalkannya di Belanda pada tahun 1970-an. Marchaim (1992) menyatakan bahwa UASB merupakan konfigurasi reaktor penanganan limbah cair domestik yang paling banyak dipelajari. Sistem ini telah beroperasi dengan bagus dan mampu menghasilkan effluen bermutu baik. Penggunaan teknik UASB pada pengolahan limbah semakin diminati karena biaya operasi rendah, dapat menangani bahan cemaran tinggi, dan tidak butuh tempat luas.

Pengolahan limbah cair organik secara anaerobik mampu menghasilkan biogas yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian tentang banyaknya produksi biogas yang dihasilkan dari pengolahan limbah cair tahu secara anaerobik. Data yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan penampung biogas sesuai dengan kapasitas limbah yang diolah dan pemanfaatannya.

B. Ringkasan

Limbah cair tahu mengandung bahan organik cukup tinggi, sehingga bila dibuang langsung ke lingkungan dapat menurunkan mutu lingkungan tersebut. Pengolahan limbah cair tahu secara anaerobik diharapkan dapat mengurangi pencemaran lingkungan dan menghasilkan sumber energi alternatif secara mudah dan murah. Penggunaan UASB yang dilengkapi dengan alat penangkap gas dan kran pengambilan sampel diharapkan dapat digunakan untuk mengetahui laju produksi biogas, penurunan COD, dan kenaikan pH limbah cair sehingga dapat dijadikan sebagai dasar dalam perancangan instalasi penanganan limbah yang memanfaatkan biogas

sebagai energi alternatif yang diperoleh dari hasil pengolahan limbah secara anaerobik.

II. Mengetahui Lebih Jauh Tentang Tahu, Limbah dan Potensinya

A. Tahu

Kedelai mengandung protein 35 % bahkan pada varietas unggul kadar proteinnya dapat mencapai 40 - 43 %. Kandungan protein kedelai hampir menyamai kadar protein susu skim kering lebih tinggi daripada beras, jagung, tepung singkong, kacang hijau, daging, ikan segar, dan telur ayam. Bila seseorang tidak boleh atau tidak dapat makan daging atau sumber protein hewani lainnya, kebutuhan protein sebesar 55 gram per hari dapat dipenuhi dengan makanan yang berasal dari 157,14 gram kedelai.

Kedelai dapat diolah menjadi: tempe, keripik tempe, tahu, kecap, susu, dan lain-lainnya. Proses pengolahan kedelai menjadi berbagai makanan pada umumnya merupakan proses yang sederhana, dan peralatan yang digunakan cukup dengan alat-alat yang biasa dipakai di rumah tangga, kecuali mesin pengupas, penggiling, dan cetakan.

Tabel 2.1 Komposisi Kedelai per 100 gram Bahan

KOMPONEN	KADAR (%)
Protein	35-45
Lemak	18-32
Karbohidrat	12-30
Air	7.

Sumber : Menristek (2005)

Tahu merupakan salah satu makanan berbasis kedelai yang populer. Tahu berasal dari kata *Tao Hu* yang artinya kacang hancur seperti bubur (Nurhasan dan Pramudyanto, 1991). Tahu adalah ekstrak protein kedelai yang telah digumpalkan dengan asam, ion kalsium, atau bahan penggumpal lainnya (Rans, 2005).

Tahu mengandung protein nabati yang berguna bagi pertumbuhan tubuh dan dikenal sejak dulu di daratan Cina lalu populer di masyarakat Indonesia karena rasanya enak, mudah pembuatannya dan dapat diolah menjadi berbagai bentuk masakan serta harganya murah. Kandungan protein tahu setara dengan protein hewani. Nilai NPU (*net protein utility*) tahu sekitar 65 % yang mencerminkan banyaknya protein yang dapat

dimanfaatkan tubuh dan mempunyai daya cerna tinggi sekitar 85-98% sehingga tahu dapat dikonsumsi oleh segala lapisan masyarakat. Kandungan zat gizi tahu yang penting lainnya seperti lemak, vitamin, dan mineral juga cukup tinggi (Mudjajanto, 2005).

Dasar pembuatan tahu adalah melarutkan protein yang terkandung dalam kedelai dengan menggunakan air sebagai pelarutnya. Setelah protein tersebut larut, diusahakan untuk diendapkan kembali dengan penambahan bahan pengendap sampai terbentuk gumpalan-gumpalan protein yang akan menjadi tahu (Menristek, 2005).

Selain memiliki kelebihan, tahu juga mempunyai kelemahan, yaitu kandungan airnya yang tinggi sehingga mudah rusak karena mudah ditumbuhi mikroba. Untuk memperpanjang masa simpan, kebanyakan industri tahu yang ada di Indonesia menambahkan pengawet. Banyak pengusaha nakal menambahkan formalin dan pewarna methanyl yellow yang merupakan bahan tambahan pangan (BTP) yang dilarang penggunaannya dalam makanan menurut peraturan Menteri Kesehatan (Menkes) Nomor 1168/Menkes/PER/X/1999 (Mudjajanto, 2005).

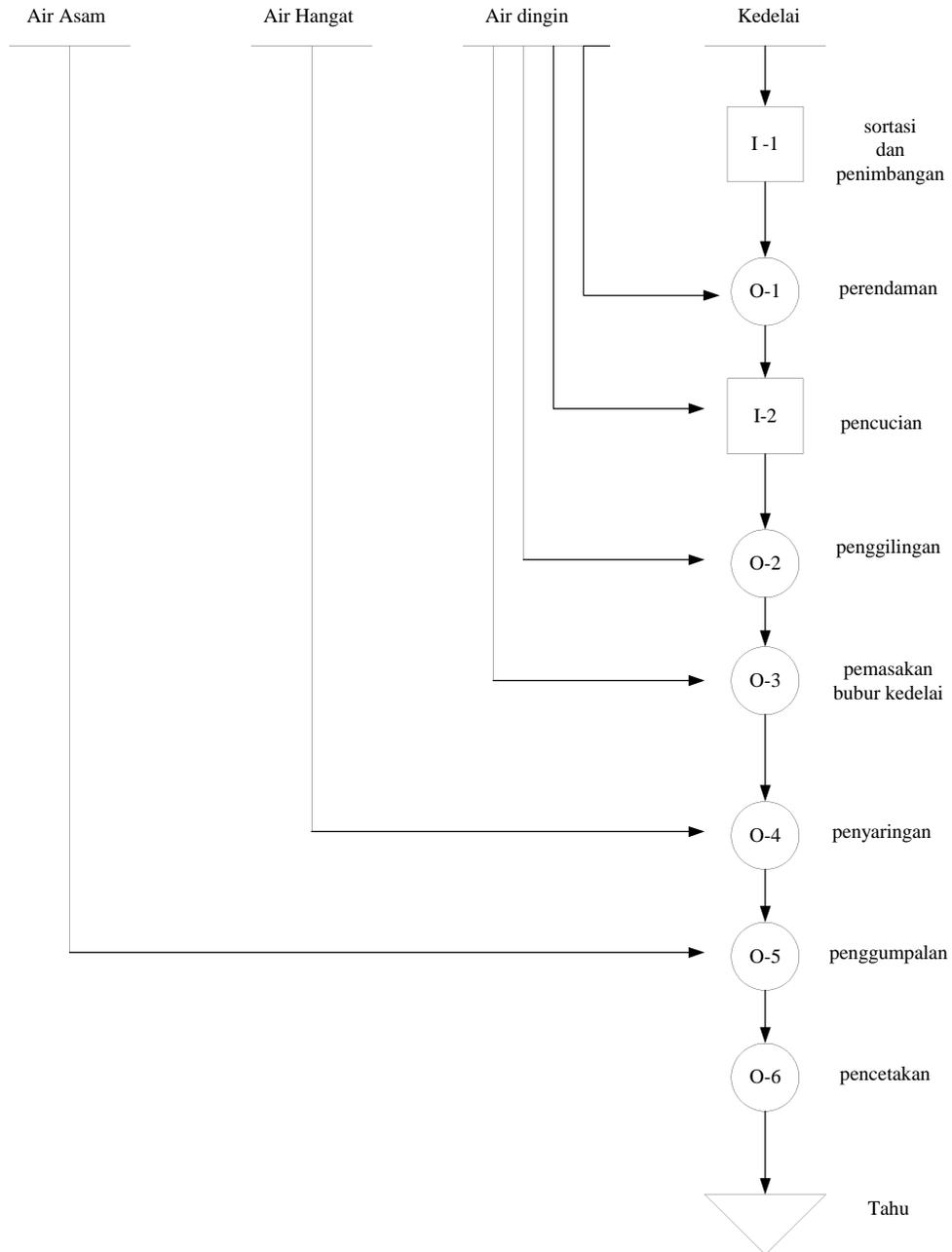
Dalam pembuatan tahu diperlukan bahan antara lain : kedelai 5 kg, air secukupnya, dan batu tahu 1 gram. Sedangkan alat yang diperlukan

antara lain : ember besar, tampah (nyiru), kain saring atau kain blacu, kain pengaduk, cetakan, keranjang, rak bambu, tungku atau kompor, dan alat penghancur (alu)

Adapun cara pembuatannya adalah sebagai berikut (Menristek, 2005) :

1. Pilih kedelai yang bersih, kemudian dicuci;
1. Rendam dalam air bersih selama sekitar 8 jam (paling sedikit 3 liter air untuk 1 kg kedelai). Kedelai akan mengembang jika direndam;
2. Cuci berkali-kali kedelai yang telah direndam. Apabila kurang bersih maka tahu yang dihasilkan akan cepat menjadi asam;
3. Tumbuk kedelai dan tambahkan air hangat sedikit demi sedikit hingga berbentuk bubur;
4. Masak bubur tersebut, jangan sampai mengental pada suhu $70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ditandai dengan adanya gelembung-gelembung kecil);
5. Saring bubur kedelai dan endapkan airnya dengan menggunakan batu tahu (Kalsium Sulfat = CaSO_4) sebanyak 1 gram atau 3 ml asam cuka untuk 1 liter sari kedelai, sedikit demi sedikit sambil diaduk perlahan-lahan.
6. Cetak dan pres endapan tersebut.

Secara ringkas, cara pembuatan tahu dapat dilihat pada PPO (peta proses operasi berikut ini (Anwar, 2005) :



Gambar 2.1 PPO Cara pembuatan tahu

B. Limbah Industri Tahu

Limbah tahu adalah limbah yang dihasilkan dalam proses pembuatan tahu maupun pada saat pencucian kedelai.

Limbah yang dihasilkan dari industri tahu menurut Nurhasan (1991) berupa :

a. limbah padat

Buangan padat pabrik tahu berasal dari proses pencucian penyaringan berupa biji yang jelek, ceceran biji, dan batu kerikil yang terikut dalam biji. Dari proses penyaringan dihasilkan limbah padat berupa ampas tahu, sedangkan dari proses pengepresan dihasilkan potongan-potongan tahu yang tercecer. Limbah padat belum terlalu mencemari lingkungan karena bisa digunakan untuk membuat tempe dan pakan ternak sapi, kerbau, kambing, babi, dan ikan.

b. limbah cair

Sebagian besar buangan pabrik tahu adalah limbah cair yang mengandung sisa air dari susu tahu yang tidak tergumpal menjadi tahu, sehingga limbah cair pabrik tahu masih mengandung zat-zat organik seperti protein, karbohidrat dan lemak. Selain zat terlarut,

limbah cair juga mengandung padatan tersuspensi atau padatan terendapkan misalnya potongan tahu yang kurang sempurna saat pemrosesan.

Limbah padat belum dirasakan dampaknya terhadap lingkungan karena dapat dimanfaatkan untuk makanan ternak, tetapi limbah cair akan mengakibatkan bau busuk dan bila dibuang langsung ke sungai akan menyebabkan tercemarnya sungai tersebut.

C. Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu

Pengetahuan tentang karakteristik limbah sangat penting karena untuk menentukan teknologi apa yang harus dipilih dalam penanganan limbah. Metode penanganan limbah yang telah berhasil pada suatu industri belum tentu berhasil diaplikasikan untuk industri lainnya.

Limbah cair pabrik industri merupakan limbah agroindustri yang mengandung bahan organik dan nutrien tinggi. Lettinga *et al.* (1994) menyatakan bahwa bahan organik tersebut dapat dikenali melalui karakteristiknya yaitu dapat dioksidasi dan mengandung karbon.

Karakteristik limbah cair tahu antara lain (Nurhasan dan Pramudyanto, 1991) :

- a. Temperatur limbah cair tahu biasanya tinggi (60 – 80 °C) karena proses pembuatan tahu butuh suhu tinggi pada saat penggumpalan dan penyaringan.
- b. Warna air buangan transparan sampai kuning muda dan disertai adanya suspensi warna putih. Zat terlarut dan tersuspensi mengalami penguraian hayati maupun kimia sehingga berubah warna. Proses ini merugikan karena air buangan berubah menjadi warna hitam dan busuk yang memberi nilai estetika kurang baik.
- c. Bau air buangan industri tahu dikarenakan proses pemecahan protein oleh mikroba alam sehingga timbul bau busuk dari gas H₂S.
- d. Kekeruhan pada limbah disebabkan oleh adanya padatan tersuspensi dan terlarut dalam limbah cair pabrik tahu.
- e. pH rendah.

Limbah cair tahu mengandung asam cuka sisa proses penggumpalan tahu sehingga limbah cair tahu bersifat asam. Pada kondisi asam ini terlepas zat-zat yang mudah menjadi gas.

- f. COD dan BOD tinggi.

Pencemaran limbah cair organik pada suatu perairan diukur dengan uji COD dan BOD (Indriyati, 2005). Angka COD biasanya lebih besar

2 - 3 kali angka BOD. Nilai COD menunjukkan banyaknya oksigen yang digunakan dalam proses oksidasi oleh zat-zat organik yang terkandung dalam limbah cair yang ekuivalen dengan nilai konsentrasi kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) (Ginting, 1992). Angka COD merupakan ukuran bagi pencemaran air oleh bahan-bahan organik yang secara alamiah dapat dioksidasikan melalui proses biologis, dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air (Algert, 1987). Wagiman (2004) menyatakan bahwa fluktuasi COD berada pada jangkauan antara 10.000 - 100.000 mg/L. Malina dan Pohland (1992) dalam Damanhuri *et al.* (1997) menyatakan bahwa nilai COD limbah cair tahu di atas 4.000 mg/L. Jadi, nilai COD limbah cair tahu berkisar antara 4.000 - 100.000 mg/L.

Santika (1987) dalam Wagiman, *et.all.* (2003) menyatakan bahwa limbah cair tahu secara alami sudah mengandung mikroorganisme karena kandungan bahan organiknya tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi mikroorganisme limbah cair tahu sangat tinggi yaitu 10^{-1} mikrobial, yang berarti limbah tahu di sentra industri tahu Gamping termasuk kategori tercemar berat. Limbah cair yang dihasilkan mengandung padatan tersuspensi maupun terlarut, akan mengalami

perubahan fisika, kimia, dan hayati yang akan menghasilkan zat beracun atau menciptakan media untuk tumbuhnya kuman dimana kuman ini dapat berupa kuman penyakit atau kuman lainnya yang merugikan baik pada tahu sendiri ataupun tubuh manusia. Bila dibiarkan dalam limbah cair akan berubah warnanya menjadi coklat kehitaman dan berbau busuk yang bisa mengakibatkan sakit pernapasan. Apabila limbah cair ini merembes ke dalam tanah yang dekat dengan sumur maka air sumur itu tidak dapat dimanfaatkan lagi. Apabila limbah ini dialirkan ke sungai maka akan mencemari sungai dan bila masih digunakan maka akan menimbulkan penyakit gatal, diare, dan penyakit lainnya (Nurhasan, 1991).

Limbah cair dari tahu yang paling berbahaya apabila dibuang secara langsung ke lingkungan adalah *whey* yang merupakan hasil samping proses penggumpalan dan kandungan bahan organiknyanya sangat tinggi (Suryandono, 2004) dan pHnya rendah karena mengandung cuka sisa bahan untuk pembuatan tahu. Secara fisik, *whey* berwarna kuning, kental, dan berbau menyengat jika tersimpan lebih dari 24 jam.

Tabel 2.2 Karakteristik limbah cair tahu (*whey*)

Parameter	Satuan	Nilai
1.pH	-	4-5
2. COD	mg/L	30.000 - 40.000
3. BOD	mg/L	10.000 - 15.000
4. N-NH ₃	mg/L	30 - 40
5. N-total	mg/L	300 - 350
6. Protein	%	0,30 - 0,40
7. Padatan tersuspensi	mg/L	6.000 - 8.000

Sumber : Wagiman, *et.all* (2003)

III. PENGENDALIAN LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU

A. Pengendalian Limbah Cair Tahu dengan Sistem Anaerobik

Salah satu dasar pertimbangan dalam pemilihan teknologi pengolahan limbah cair adalah karakteristik limbah cair (Pusteklim, tanpa tahun).

Dengan melihat karakteristik limbah cair tahu di atas, maka limbah cair tahu tergolong limbah cair yang mengandung bahan organik yang tinggi dan pada umumnya *biodegradable* atau mudah diurai oleh mikrobia. Kondisi tersebut akan sangat menguntungkan untuk diolah dengan proses biologis, yaitu memanfaatkan kehidupan mikrobia untuk menguraikan zat organik. Menurut Metcalf dan Eddy (1991), penanganan limbah secara biologik adalah untuk menghilangkan bahan-bahan terlarut dan bahan padat koloid yang tidak mengendap (*non settleable colloid solid*).

Jenie dan Winiati (1993) menyatakan bahwa *sistem biologik* merupakan sistem utama yang digunakan untuk menangani limbah organik secara aerob maupun anaerob. Proses-proses yang berlangsung berdasarkan pada dasar-dasar mikrobiologi. Mikroorganisme

menggunakan limbah sebagai sumber nutrisi dan menyediakan energi untuk pembangunan sel.

Anonim (2003) dalam Wagiman (2004) menyatakan bahwa pengolahan limbah secara anaerobik sangat cocok untuk mengolah limbah cair yang mengandung bahan organik kompleks seperti limbah dari industri makanan, minuman, bahan kimia dan obat-obatan.

Beberapa alasan yang dipakai untuk penggunaan proses anaerobik dalam penanganan limbah antara lain : laju reaksi lebih tinggi dibanding aerobik, kegunaan produk akhir dan stabilisasi bahan organik (Wagiman, 2004).

Karakteristik proses pengolahan anaerobik dapat dijelaskan sebagai berikut (Pusteklim, tanpa tahun) :

1. mampu menerima beban organik yang tinggi per satuan volume reaktornya sehingga volume reaktor relatif lebih kecil dibandingkan dengan proses aerobik
2. tanpa energi untuk prosesnya tetapi dapat menghasilkan energi
3. menghasilkan surplus lumpur yang rendah
4. pertumbuhan mikroba yang lambat
5. membutuhkan stabilitas pH pada daerah netral (6,5-7,5)

Menurut Lettinga (1994) faktor-faktor lingkungan yang sangat berpengaruh pada pengolahan limbah secara anaerobik adalah suhu, pH, adanya nutrisi esensial (makronutrien, nitrogen, fosfor, dan mikronutrien), serta tidak adanya senyawa racun.

Bakteri-bakteri anaerobik mesofilik mampu tumbuh pada suhu 20 - 45 °C (Jenie dan Winiati, 1993). Proses digesti akan optimum pada suhu 35 - 40 °C untuk range mesofil dan 55 °C untuk termofil. Nilai dan kestabilan pH pada reaktor anaerobik sangat penting karena metanogenesis terjadi pada kisaran pH netral (6,3 - 7,8). Senyawa racun yang berpengaruh adalah logam berat, senyawa kloro-organik, oksigen dan sulfida. Sebagian oksigen masuk saat distribusi influen, namun selanjutnya digunakan dalam metabolisme oksidatif pada proses asidogenesis sehingga tidak ada lagi oksigen terlarut dalam reaktor (Lettinga, 1994).

Sardjoko (1991) dalam Hasan (2004) menyatakan bahwa pengolahan limbah secara anaerob mempunyai keuntungan sebagai berikut :

1. menghasilkan lumpur yang secara biologi sangat stabil

2. memerlukan sedikit unsur hara karena menghasilkan sedikit jaringan sel
3. tidak memerlukan energi untuk aerasi
4. menghasilkan gas metan sebagai produk akhir yang mempunyai nilai ekonomis
5. lumpur anaerob dapat disimpan tanpa pemberian zat makanan

Sedangkan kelemahannya adalah :

1. agak peka terhadap kehadiran senyawa tertentu, seperti CHCl_3 , CCl_4 , dan CN
2. diperlukan waktu *start up* yang relatif lama sebagai akibat pertumbuhan anaerob yang sangat lambat
3. pada dasarnya merupakan proses pengolahan awal sehingga memerlukan pengolahan lanjutan untuk bisa dibuang

Penanganan secara anaerobik hanya menurunkan sebagian kandungan bahan organik dan dalam banyak kasus diikuti dengan penanganan aerobik (Mahida, 1984).

Indriyati (2005) menyatakan bahwa kemampuan pertumbuhan bakteri metan sangat rendah, membutuhkan waktu dua sampai lima hari

untuk penggandaannya, sehingga membutuhkan reaktor yang bervolume cukup besar.

Lamanya waktu pertumbuhan mikrobia mengakibatkan waktu start up menjadi lama. Hal ini bisa diatasi dengan penambahan bahan pengurai limbah organik. Bahan pengurai limbah organik tersebut antara lain Starbio Plus, Bio Fund, EMMA, EM-4, Decomic (UMM, 2006), Bio2000 serta Starbio-CC yang terbukti mampu menguraikan limbah secara cepat, praktis dan mudah (Yusri, 2004).

B. Proses Transformasi Bahan Organik

Pengolahan limbah secara anaerobik mengakibatkan terjadinya transformasi makromolekul bahan organik menjadi molekul-molekul yang lebih sederhana. Menurut Lettinga (1994), terdapat empat tahap proses transformasi bahan organik pada sistem anaerobik, yaitu :

1. Hidrolisis

Pada tahapan hidrolisis, mikrobia hidrolitik mendegradasi senyawa organik kompleks yang berupa polimer menjadi monomernya yang berupa senyawa tak terlarut dengan berat molekul yang lebih ringan. Lipida berubah menjadi asam lemak

rantai panjang dan gliserin, polisakarida menjadi gula (mono dan disakarida), protein menjadi asam amino dan asam nukleat menjadi purin dan pirimidin. Konversi lipid berlangsung lambat pada suhu dibawah 20 °C. Proses hidrolisis membutuhkan mediasi exo-enzim yang dieksresi oleh bakteri fermentatif . Hidrolisis molekul kompleks dikatalisasi oleh enzim ekstra seluler seperti sellulase, protease, dan lipase. Walaupun demikian proses penguraian anaerobik sangat lambat dan menjadi terbatas dalam penguraian limbah sellulolitik yang mengandung lignin (Said, 2006).

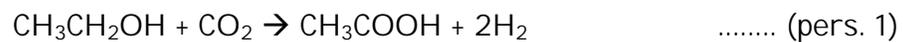
2. Asidogenesis.

Monomer-monomer hasil hidrolisis dikonversi menjadi senyawa organik sederhana seperti asam lemak volatil, alkohol, asam laktat, senyawa mineral seperti karbondioksida, hidrogen, amoniak, dan gas hidrogen sulfida. Tahap ini dilakukan oleh berbagai kelompok bakteri, mayoritasnya adalah bakteri obligat anaerob dan sebagian yang lain bakteri anaerob fakultatif.

3. Asetogenesis

Hasil asidogenesis dikonversi menjadi hasil akhir bagi produksi metana berupa asetat, hidrogen, dan karbondioksida. Sekitar 70 % dari COD semula diubah menjadi asam asetat. Pembentukan asam asetat kadang-kadang disertai dengan pembentukan karbondioksida atau hidrogen, tergantung kondisi oksidasi dari bahan organik aslinya.

Etanol, asam propionat, dan asam butirat dirubah menjadi asam asetat oleh bakteri asetogenik dengan reaksi seperti berikut (Said, 2006) :



Etanol Asam Asetat



Asam Propionat Asam Asetat



Asam Butirat Asam Asetat

4. Metanogenesis.

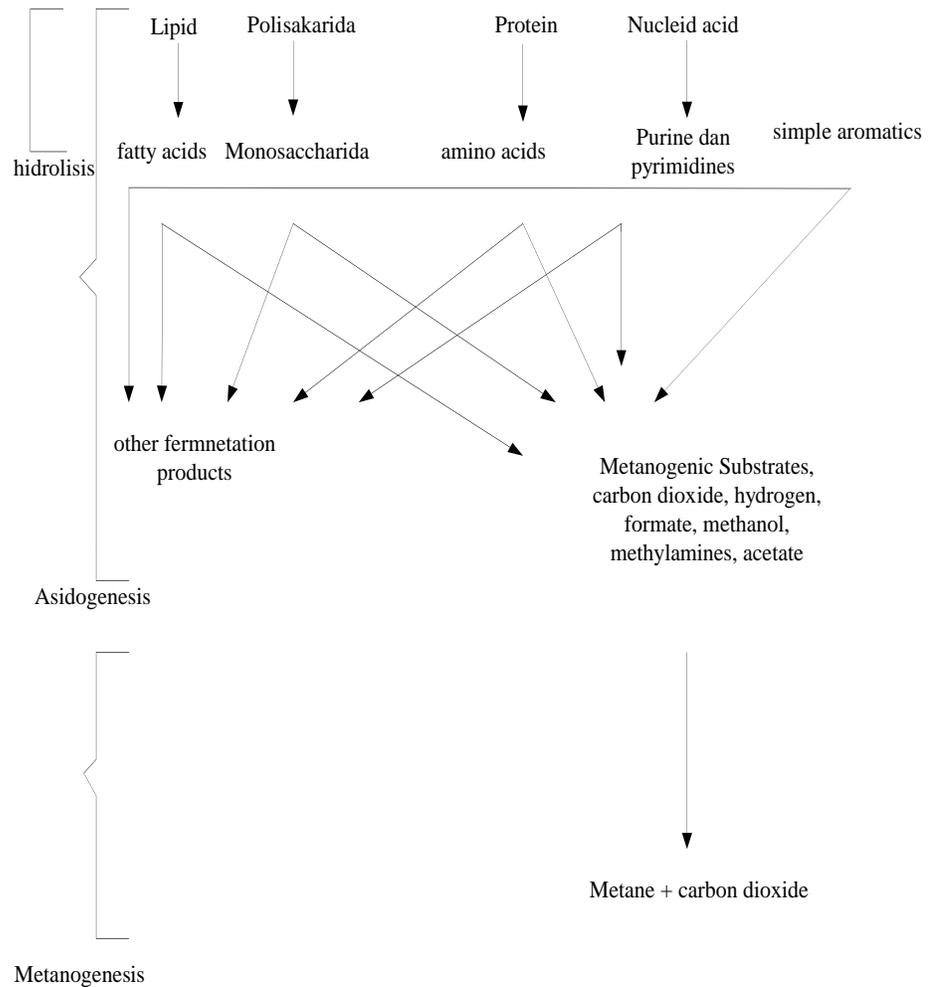
Pada tahap metanogenesis, terbentuk metana dan karbondioksida. Metana dihasilkan dari asetat atau dari reduksi

karbondioksida oleh bakteri asetotropik dan hidrogenotropik dengan menggunakan hidrogen.

Tiga tahap pertama di atas disebut sebagai fermentasi asam sedangkan tahap keempat disebut fermentasi metanogenik (Lettinga, *et al*, 1994). Tahap asetogenesis terkadang ditulis sebagai bagian dari tahap asidogenesis.

Fermentasi asam cenderung menyebabkan penurunan pH karena adanya produksi asam lemak volatil dan intermediet-intermediet lain yang memisahkan dan memproduksi proton. Metanogenesis hanya akan berkembang dengan baik pada kondisi pH netral sehingga ketidakstabilan mungkin muncul sehingga aktivitas metanogen dapat berkurang. Kondisi ini biasa disebut *souring* (pengasaman) (Lettinga, 1994).

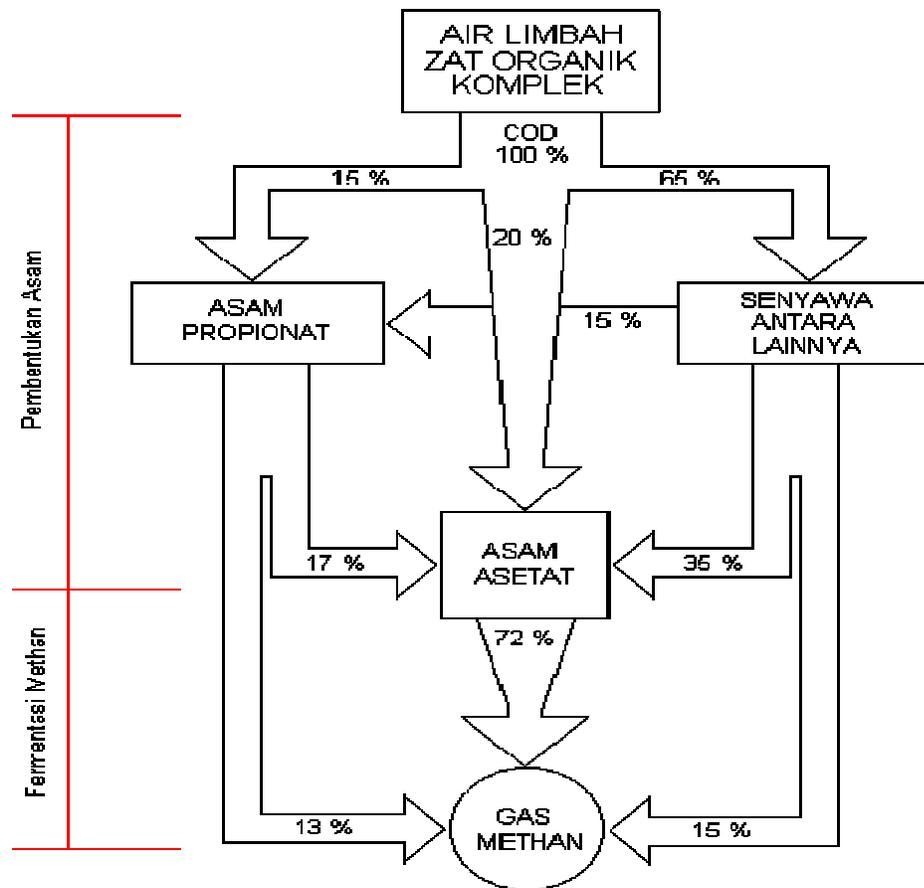
Tahapan proses transformasi bahan organik tersebut disajikan pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Tahapan transformasi bahan organik secara anaerobik (Metcalf dan Eddy, 1991).

Berbagai studi tentang digesti anerobik pada berbagai ekosistem menunjukkan bahwa 70 % atau lebih metana yang terbentuk diperoleh dari asetat (pers. 1). Jadi asetat merupakan intermediet kunci pada

seluruh fermentasi pada berbagai ekosistem tersebut (Main *et al.* 1977). Hanya sekitar 33 % bahan organik yang dikonversi menjadi metana melalui jalur hidrogenotropik dari reduksi CO₂ menggunakan H₂ (pers. 2) (Marchaim,1992). Konversi bahan organik menjadi metan dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Neraca massa penguraian bahan organik menjadi metana (Said *et all*, 2006)

Reaksi kimia pembentukan metan dari asam asetat dan reduksi CO₂ dapat dilihat pada persamaan reaksi berikut :

Asetotropik metanogenesis :



Hidrogenotropik metanogenesis :



Henzen and Harremoe (1983) dalam Lettinga *et all* (1994) menyatakan bahwa bakteri yang memproduksi metana dari hidrogen dan karbondioksida tumbuh lebih cepat daripada yang menggunakan asam asetat. Kecepatan penguraian biopolimer, tidak hanya tergantung pada jumlah jenis bakteri yang ada dalam reaktor, akan tetapi juga efisiensi dalam mengubah substrat dengan kondisi-kondisi waktu tinggal substrat di dalam reaktor, kecepatan alir efluen, temperatur dan pH yang terjadi di dalam bioreaktor. Bilamana substrat yang mudah larut dominan, reaksi kecepatan terbatas akan cenderung membentuk metana dari asam asetat dan dari asam lemak dengan kondisi stabil atau *steady state*. Faktor lain yang mempengaruhi proses antara lain waktu tinggal atau lamanya substrat berada dalam suatu reaktor sebelum dikeluarkan sebagai supernatan atau *digested sludge* (efluen). Minimum

waktu tinggal harus lebih besar dari waktu generasi metan sendiri, agar mikroorganisme didalam reaktor tidak keluar dari reaktor atau yang dikenal dengan istilah *wash out* (Indriyati, 2005).

Mikroba yang bekerja butuh makanan yang terdiri atas karbohidrat, lemak, protein, fosfor dan unsur-unsur mikro. Lewat *siklus biokimia*, nutrisi diuraikan dan dihasilkan energi untuk tumbuh. Dari proses pencernaan anaerobik ini akan dihasilkan gas metan. Bila unsur-unsur dalam makanan tak berada dalam kondisi yang seimbang atau kurang, bisa dipastikan produksi enzim untuk menguraikan molekul karbon kompleks oleh mikroba akan terhambat. Pertumbuhan mikroba yang optimum biasanya membutuhkan perbandingan unsur C : N : P sebesar 150 : 55 : 1 (Jenie dan Winiati, 1993). Namun, aktivitas metabolisme dari bakteri metanogenik akan optimal pada nilai rasio C/N sekitar 8-20 (Anonim, 2005).

Ada beberapa senyawa yang bisa menghambat (proses) penguraian dalam suatu unit biogas saat menyiapkan bahan baku untuk produksi biogas, seperti antibiotik, desinfektan dan logam berat (Setiawan, 2005).

C. Mikrobia dalam Pengolahan Limbah Cair Tahu

Mikrobia merupakan salah satu faktor kunci yang ikut menentukan berhasil tidaknya suatu proses penanganan limbah cair organik secara biologi. Keberadaannya sangat diperlukan untuk berbagai tahapan dalam perombakan bahan organik.

Marchaim (1992) menyatakan bahwa efektifitas biodegradasi limbah organik menjadi metana membutuhkan aktifitas metabolik yang terkoordinasi dari populasi mikrobia yang berbeda-beda. Populasi mikroba dalam jumlah dan kondisi fisiologis yang siap diinokulasikan pada media fermentasi disebut sebagai starter.

Bakteri, suatu grup prokariotik, adalah organisme yang mendapat perhatian utama baik dalam air maupun dalam penanganan air limbah (Jenie dan Winiati, 1993). Jadi, dalam proses anaerobik, mikrobia yang digunakan berasal dari golongan bakteri. Bakteri yang bersifat fakultatif anaerob yaitu bakteri yang mampu berfungsi dalam kondisi aerobik maupun anaerobik. Bakteri-bakteri tersebut dominan dalam proses penanganan limbah cair baik secara aerobik ataupun anaerobik.

Marchaim (1992) menyatakan bahwa digesti atau pencernaan bahan organik yang efektif membutuhkan kombinasi metabolisme dari berbagai jenis bakteri anaerobik.

Beberapa jamur (fungi) dan protozoa dapat ditemukan dalam penguraian anaerobik, tetapi bakteri merupakan mikroorganisme yang paling dominan bekerja didalam proses penguraian anaerobik. Sejumlah besar bakteri anaerobik dan fakultatif yang terlibat dalam proses hidrolisis dan fermentasi senyawa organik antara lain adalah *Bacteroides*, *Bifidobacterium*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*. Bakteri asidogenik (pembentuk asam) seperti *Clostridium*, bakteri asetogenik (bakteri yang memproduksi asetat dan H₂) seperti *Syntrobacter wolinii* dan *Syntrophomonas wolfei* (Said, 2006)

Bakteri metana yang telah berhasil diidentifikasi terdiri dari empat genus (Jenie dan Rahayu, 1993) :

1. Bakteri bentuk batang dan tidak membentuk spora dinamakan *Methanobacterium*.
2. Bakteri bentuk batang dan membentuk spora adalah *Methanobacillus*.

3. Bakteri bentuk kokus yaitu *Methanococcus* atau kelompok koki yang membagi diri.
4. Bakteri bentuk sarcina pada sudut 90° dan tumbuh dalam kotak yang terdiri dari 8 sel yaitu *Methanosarcina*.

Bakteri metanogen melaksanakan peranan penting pada digesti anaerob karena mengendalikan tingkat degradasi bahan organik dan mengatur aliran karbon dan elektron dengan menghilangkan metabolit perantara yang beracun dan meningkatkan efisiensi termodinamik dari metabolisme perantara antar spesies.

Soetarto *et al.* (1999) menyatakan bahwa bakteri metanogen merupakan obligat anaerob yang tidak bisa tumbuh pada keadaan yang terdapat oksigennya dan menghasilkan metan dari oksidasi hidrogen atau senyawa organik sederhana seperti asetat dan metanol serta tidak dapat menggunakan karbohidrat, protein, dan substrat kompleks organik yang lain. Bakteri penghasil metan bersifat gram variabel, anaerob, dapat mengubah CO_2 menjadi metan, dinding selnya mengandung protein tetapi tidak mempunyai peptidoglikan. Bakteri ini merupakan mikrobial *Archaeobacteria* yang merupakan jasad renik prokariotik yang habitatnya sangat ekstrim. *Archaeobacteria* adalah kelompok prokariot yang sangat

berbeda dari *eubacteria*. Dinding selnya tidak mengandung peptidoglikan (murein), tidak sensitif terhadap kloramfenikol. Pada *Methanobacterium sp.*, dinding selnya mengandung materi seperti peptidoglikan yang disebut pseudopeptidoglikan atau pseudomurein tersusun dari N asetil glukosamin dan asam N asetil talosaminuronat (2 gula amino). Asam amino yang ada semuanya bentuk L (pada peptidoglikan bentuk D). Dinding sel *Archaeobacteria* tahan terhadap lisosim. *Methanosarcina sp.* mengandung dinding sel tebal galaktosamin, asam glukuronat, dan glukosa. Dinding sel *Methanococcus* dan *Methanomicrobium* mengandung protein dan kekurangan karbohidrat.

Dwidjoseputro (1998) menyatakan bahwa ciri genus *Methanobacterium* adalah anaerob, autotrof/heterotrof, dan menghasilkan gas metan. Bakteri autotrof (seringkali dibedakan antara kemoautotrof dan fotoautotrof) dapat hidup dari zat-zat anorganik. Bakteri heterotrof membutuhkan zat organik untuk kehidupannya.

Substrat yang digunakan oleh bakteri metanogen berupa karbon dengan sumber energi berupa H_2/CO_2 , format, metanol, metilamin, CO, dan asetat. Kebanyakan metanogen dapat tumbuh pada H_2/CO_2 , akan tetapi beberapa spesies tidak dapat memetabolisme H_2/CO_2 . Nutrisi

yang dibutuhkan oleh metanogen bervariasi dari yang sederhana sampai yang kompleks. Berkaitan dengan asimilasi karbon, ada yang berupa metanogen autotrof dan heterotrof. Di habitat aslinya, bakteri metanogen tergantung dari bakteri lain yang menyuplai nutrisi esensial seperti sisa mineral, vitamin, asetat, asam amino, atau faktor-faktor tumbuh lainnya (Main and Smith, 1981).

Bakteri yang berperan dalam penguraian limbah organik secara alami tumbuh secara lambat sehingga diperlukan penambahan inokulasi pengurai limbah. Salah satu merk dagang inokulum yang biasa digunakan adalah Bio2000. Kemasan Bio2000 mendeskripsikan bahwa Bio2000 merupakan serbuk pengurai limbah organik yang didalamnya terdapat bakteri dan bahan-bahan alami yang dapat menghasilkan *bifido bacteria* (bakteri yang menguntungkan) sehingga mampu memacu penguraian limbah organik lebih cepat. Komposisi Bio2000 adalah air (3 %), % abu (72,46), protein kasar (3,57 %), lemak kasar (0,27 %), serat kasar (9,37), kalsium (19,12 %), fosfor (0,1 %), dan lain-lain (11,33 %). Bakteri yang diinokulasikan adalah bakteri amilolitik (35,43 %), selulolitik (26,64 %), proteolitik (20,84 %), dan lipolitik (17,13 %).

IV. POTENSI LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU

A. Potensi Limbah Cair Industri Tahu Sebagai Sumber Energi Alternatif Biogas

Biogas dikenal sebagai gas rawa atau lumpur dan bisa digunakan sebagai bahan bakar. Biogas adalah gas mudah terbakar yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob. Pada umumnya semua jenis bahan organik bisa diproses untuk menghasilkan biogas (Anonim, 2005).

Whey merupakan bagian limbah cair tahu yang paling berbahaya. Pengolahan limbah cair tahu secara anaerobik memungkinkan konversi *whey* menjadi biogas karena *whey* mengandung bahan organik cukup tinggi sebagaimana yang ditunjukkan oleh nilai CODnya. Pembentukan biogas terjadi selama proses fermentasi berjalan (Setiawan, 2005).

Pembuatan dan penggunaan biogas di Indonesia mulai digalakkan pada awal tahun 1970-an dengan tujuan memanfaatkan buangan atau sisa yang berlimpah dari benda yang tidak bermanfaat menjadi yang bermanfaat, serta mencari sumber energi lain di luar kayu bakar dan minyak tanah. Pembuatan biogas bisa dengan drum bekas yang masih

kuat atau sengaja dibuat dalam bentuk bejana dari tembok atau bahan-bahan lainnya (Suriawiria, 2005).

Biogas dipergunakan dengan cara yang sama seperti penggunaan gas lainnya yang mudah terbakar dengan mencampurnya dengan oksigen (O_2). Untuk mendapatkan hasil pembakaran yang optimal perlu dilakukan proses pemurnian/penyaringan karena biogas mengandung beberapa gas lain yang tidak menguntungkan (Anonim, 2005).

Biogas dapat digunakan untuk kepentingan penerangan dan memasak. Lampu atau kompor yang sudah umum dan biasa dipergunakan untuk gas lain selain biogas tidak cocok untuk pemakaian biogas, sehingga memerlukan penyesuaian karena bentuk dan sifat biogas berbeda dengan bentuk dan sifat gas lain yang sudah umum. Pusat Teknologi Pembangunan (PTP) ITB telah sejak lama membuat lampu atau kompor yang dapat menggunakan biogas, yang asalnya dari lampu petromak atau kompor yang sudah ada. Kompor biogas tersebut tersusun dari rangka, pembakar, *spuyer*, cincin penjepit *spuyer* dan cincin pengatur udara, yang kalau sudah diatur akan mempunyai spesifikasi temperatur nyala api dapat mencapai $560^{\circ}C$ dengan warna

nyala biru muda pada malam hari, dan laju pemakaian biogas 350 liter/jam. (Suriawiria, 2005).

Gas metan mempunyai nilai kalor antara 590 - 700 K.cal/m³. Sumber kalor lain dari biogas adalah dari H₂ serta CO dalam jumlah kecil, sedang karbon dioksida dan gas nitrogen tak berkontribusi dalam soal nilai panas. Nilai kalor biogas lebih besar dari sumber energi lainnya, seperti coalgas (586 K.cal/m³) ataupun waterngas (302 K.cal/m³). Nilai kalor biogas lebih kecil dari gas alam (967 K.cal/m³). Setiap kubik biogas setara dengan 0,5 kg gas alam cair (liquid petroleum gases/LPG), 0,5 L bensin dan 0,5 L minyak diesel. Biogas sanggup membangkitkan tenaga listrik sebesar 1,25 - 1,50 kilo watt hour (kwh) (Setiawan,2005).

Biogas merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan sangat tinggi dan cepat daya nyalanya, sehingga sejak biogas berada pada bejana pembuatan sampai penggunaannya untuk penerangan ataupun memasak, harus selalu dihindarkan dari api yang dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan (Suriawiria, 2005).

Pembuatan biogas dimulai dengan memasukkan bahan organik ke dalam digester, sehingga bakteri anaerob membusukkan bahan organik

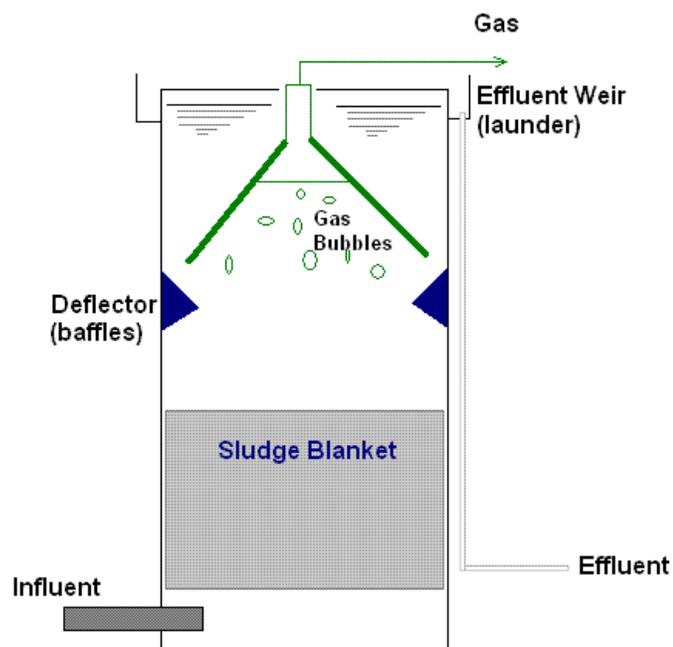
tersebut dan menghasilkan gas yang disebut biogas. Biogas yang telah terkumpul di dalam digester dialirkan melalui pipa penyalur gas menuju tangki penyimpan gas atau langsung ke lokasi penggunaannya, misalnya kompor. Biogas dapat dipergunakan dengan cara yang sama seperti cara penggunaan gas lainnya yang mudah terbakar. Pembakaran biogas dilakukan dengan mencampurnya dengan oksigen (O_2). Untuk mendapatkan hasil pembakaran yang optimal perlu dilakukan proses pemurnian/penyaringan karena biogas mengandung beberapa gas lain yang tidak menguntungkan. Keuntungan lain yang diperoleh adalah dihasilkannya lumpur yang dapat digunakan sebagai pupuk. Faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas sistem biogas antara lain jenis bahan organik yang diproses, temperatur digester, ruangan tertutup atau kedap udara, pH, tekanan udara serta kelembaban udara. Komposisi gas yang terdapat di dalam biogas adalah 40-70 % metana (CH_4), 30-60 % karbondioksida (CO_2) serta sedikit hidrogen (H_2) dan hidrogen sulfida (H_2S) (Anonim,2005).

Dari proses fermentasi dihasilkan campuran biogas yang terdiri atas, metana (CH_4), karbon dioksida, hidrogen, nitrogen dan gas lain seperti H_2S . Metana yang dikandung biogas ini jumlahnya antara 54 -

70%, sedang karbon dioksidanya antara 27 - 43%. Gas-gas lainnya memiliki persentase hanya sedikit saja (Setiawan, 2005).

B. Reaktor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

Reaktor UASB merupakan salah satu reaktor pengolah limbah cair secara anaerob dengan aliran influen dari bawah reaktor untuk memperbesar kemungkinan kontak antara lumpur mikrobia dengan limbah cair. Namun dorongan ke atas tersebut tidak boleh terlalu kuat agar lumpur mikrobia tidak ikut keluar bersama efluen (Pusteklim, 2002).



Gambar 2.4 Reaktor UASB

Konsep ini bermula dari ide Dr. Gatzke Lettinga dan koleganya pada akhir tahun 1970-an (1976-1980) di Wageningen University (Belanda) yang terinspirasi oleh publikasi Dr. Carry McCarty (Stanford, USA) saat tim Lettinga sedang bereksperimen dengan konsep filter anaerobik.

Marchaim (1992) menyatakan bahwa reaktor terbuat dari tangki bundar dimana limbah mengalir ke atas melalui lapisan lumpur anaerob yang kurang lebih sebanyak setengah dari volume reaktor. Sebuah kerucut terbalik terpasang menetap di ujung atas digester ini yang memungkinkan terjadinya pemisahan padatan-cairan. Selama masa *start-up*, padatan-padatan biologis turun dengan kurang baik, namun seiring dengan berjalannya waktu, butiran-butiran lumpur yang mengembang mulai turun mengendap dengan cukup baik.

Reaktor UASB tampak seperti sebuah tangki kosong karena sedemikian sederhana dan mudahnya desain ini. Limbah cair didistribusikan ke dalam tangki ini secara tepat melalui ceruk kecil. Limbah cair ini naik melewati lapisan lumpur anaerob dimana mikrobia yang terdapat pada lumpur tersebut mampu kontak/bersinggungan dengan substrat limbah cair tersebut. Lapisan lumpur ini tersusun dari

mikroorganisme yang secara alami membentuk granula/butiran-butiran (pellets) berdiameter 0,5 - 2 mm yang mempunyai kecepatan sedimentasi cukup tinggi dan mampu mencegah *wash-out* dari sistem ini pada beban hidrolis tinggi (Field, 2002).

Reaktor beroperasi dengan baik jika sesuai dengan kriteria yang optimum, yaitu range pH sekitar 6,6 - 7,6, suhu limbah cair sebaiknya tidak kurang dari 5 °C karena temperatur yang rendah dapat mengganggu tingkat hidrolisis dan aktivitas bakteri metanogenik. Pada musim dingin gas metan dibutuhkan untuk memanaskan limbah cair yang diolah dalam reaktor ini. Konsentrasi *Suspended solid* (SS) pada influen seharusnya tidak melebihi 500 mg/L karena dapat mempengaruhi proses anaerobik dengan (Anh, 2005) :

- a. pembentukan lapisan buih dan busa berkaitan dengan kehadiran komponen-komponen yang tak terlarut yang bersifat mengapung seperti lemak dan lipid.
- b. memperlambat atau bahkan sepenuhnya menghalangi pembentukan butiran lumpur
- c. mengakibatkan *wash out* pada reaktor

d. menurunkan seluruh aktivitas metanogenik dari lumpur yang berkaitan dengan akumulasi SS

Semula UASB digunakan untuk menangani limbah dari penyulingan gula, industri bir dan alkohol, industri penyulingan dan fermentasi, industri pangan, serta industri pulp dan kertas (Anh, 2005). Field (2003) menyatakan bahwa keempat sektor industri tersebut terhitung sebagai 87 % dari industri yang menerapkan teknologi ini. Penerapan teknologi ini juga digunakan pada penanganan efluent industri kimia dan petrokimia serta limbah cair industri tekstil. Pada iklim panas, konsep UASB cocok untuk penanganan limbah domestik (rumah tangga).

Kelompok Kerja AMPL (2004) menyatakan bahwa teknik UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) pada pengolahan limbah perkotaan semakin diminati karena biaya operasi rendah, dapat menangani beban cemaran tinggi, tidak membutuhkan tempat yang luas.

Kelebihan lain dari UASB yaitu timbulnya butiran-butiran lumpur (*granules sludge*) dan perangkat pemisah internal 3 fase yang biasa disebut sebagai *GSL (gas-sludge-liquid separator system) device*. Butiran lumpur ini mampu memberikan beberapa keuntungan karena berupa padatan tebal bio-film, berkekuatan mekanis tinggi, komunitas

mikrobia stabil, aktivitas metanogenik tinggi (0,5-2 g COD/g VSS.d), resistan terhadap kejutan racun, dan mempunyai kemampuan mengendap tinggi (30-80 m/h) (Anh,2005). Pengendapan lumpur ini mencegah terjadinya *wash out* lumpur dari sistem.

Butiran ini merupakan inti dari teknologi UASB dan EGSB. Sebuah butiran lumpur merupakan sebuah kumpulan mikrobia yang terbentuk selama penanganan limbah cair. Satu gram (berat kering) materi organik butiran lumpur dapat mengkatalisa konversi 0,5 - 1 g COD per hari menjadi metana (Field, 2002).

Perangkat internal GSL tiga fase yang terpasang pada bagian atas tangki UASB mempunyai beberapa fungsi (Anh, 2005):

- a. mengumpulkan, memisahkan, dan mengeluarkan biogas yang terbentuk
- b. mengurangi turbulensi (putaran) cairan
- c. mengurangi atau mencegah pemindahan partikel lumpur dari sistem ini.

Risiko/kelemahan reaktor UASB yaitu kurang bisa diterapkan di daerah yang bersuhu agak rendah. Marchaim (1992) menyatakan bahwa proses UASB ini lebih sering diterapkan di daerah tropis yang

biasanya bersuhu lebih dari 20 °C. Pada suhu di atas 12 °C, efisiensi perubahan COD sekitar 60 % dan tidak terlalu besar dipengaruhi oleh suhu, tingkat pembebanan, ataupun HRT. Akan tetapi pada suhu di bawah 12 °C, efisiensinya rendah. Lettinga *et al.*(1994) menyatakan bahwa pada suhu di bawah 20 °C degradasi lipida pada tahap hidrolisis berlangsung lambat.

Kelemahannya yang lain adalah mudah mengalami korosi pada dua keadaan utama :

- a. gas H₂S dapat melalui *GSL separator* dan mengumpul di atas permukaan air pada reaktor bagian atas. Gas ini akan dioksidasi menjadi sulfat oleh oksigen di udara menjadi bentuk *sulphuric acid* yang nanti pada gilirannya menyebabkan korosi pada beton dan baja
- i. di bawah permukaan air : kalsium oksida (CaO) dapat dilarutkan oleh karbondioksida dalam cairan pada pH rendah.

Pencegahan dilakukan dengan menyusun reaktor UASB dari bahan anti karat seperti stainless steel atau plastik, atau diberi lapisan permukaan yang tepat.

Kelompok Kerja AMPL (2004) menyatakan bahwa efluen dari UASB belum memenuhi baku mutu limbah buangan khususnya pengurangan nutrient dan bakteri patogen masih terlalu kecil.

Peningkatan performansi UASB dapat diperbaiki dengan meningkatkan kontak antara mikrobia dan limbah cair yang bisa dicapai dengan melakukan resirkulasi efluen (Marchaim, 1992).

DAFTAR PUSTAKA

- Anh, Nguyen Tuan. 29 Juni 2005 2005. *Methods for UASB Reactor Design*. www.Waterandwastewater.com.
- Anonim. 1994. Lembaga Penelitian UGM. Yogyakarta
- Anonim, 10 Mei 2005. *Teknologi Biogas* www.balipost.co.id
- Anonim. 22 September 2005. *Limbah Industri Pangan*. www.menlh.go.id
- Anonim. 2005. *Biogas Plants*. www.Crtnepal.org.
- Anwar. 2005. *Laju Produksi Biogas Pada Proses Pengolahan Limbah Cair Tahu dengan Menggunakan Anaerobic Baffled Reactor (ABR)*. FTP UGM. Yogyakarta
- Boone. D.R.,1985. *Fermentation Feactions of Anaerobic Digestion*. Dalam P.N. Cheremisinoff dan R.P. Oulette, *Biotechnology : Application and Research*. Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster
- Damanhuri,T.P., Halim,N. dan Nurtiono, S. 1997. *The Role of Effluen Recirculation in Increasing Efficiency of Anaerobic and Aerobic Wastewatertreatment of Tofu Industry*. ITB. Bandung

- Djarwanti, Sartantomo, Sukani. 1994. *Laporan Penelitian Pemanfaatan Energi dari Hasil Pengolahan Air Limbah Industri Tahu dan Tempe*. Departemen Perindustrian RI . Semarang
- FAO. 1996. *A System Approach to Biogas Technology*. www.fao.org.
- Field, Jim. 15 September 2002. *Anaerobic Granular Sludge Bed Reactor Technology*. www.Uasb.org.
- Field, Jim. 20 September 2002. *Granulation*. www.Uasb.org.
- Harahap, D. Filino; Apandi; Ginting. 1978. *Teknologi Gas Bio*. Surya International. Pusat Teknologi Pembangunan ITB. Bandung
- Hasan, Mahmud. 2004. *Laporan Praktikum Penanganan Limbah*. Jurusan TIP FTP UGM. Yogyakarta
- Henzen, M. and Harremoes, P. 1983. *Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors-a literatur review*. *Water Science and Technology*.
- Indriyati. 2005. *Pengaruh Waktu Tinggal Substrat Terhadap Efisiensi Reaktor Tipe Totally Mix*. www.iptek.net.id
- Kelompok Kerja AMPL. 15 Oktober 2004. *Sekilas Down-flow Hanging Sponge (DHS)*. www.ampl.or.id

Lettinga, Gatzke and Haandel, A.C.V. 1994. *Anaerobic Sewage Treatment, a Practical Guide for Regions with a Hot Climate.*

John Wiley and Son. Inggris

Marchaim, Uri. 1992. *Biogas Processes for Sustainable Development.*

Israel

Menristek. 22 Sep 2005 *TTG Pengolahan Pangan Tahu.* www.lptek.net

Mudjajanto, Eddy Setyo. 30 Maret 2005,. *Tahu, Makanan Favorit yang Keamanannya Perlu Diwaspadai.*

Nurhasan, Pramudyanto, B.B., 1991. *Penanganan Air Limbah Pabrik Tahu.*

Yayasan Bina Kasta Lestari Bintarti. Semarang

Pusteklim. *Pengolahan Air Limbah Industri Tahu.* Pusteklim.

Yogyakarta

Rans. 26 Januari 1999. *Tahu.* www.warintek.progressio.or.id

Said, Nusa Idaman; Haryoto; Nugro; dan Arie. 2006. *Teknologi Pengolahan Limbah Tahu-Tempe Dengan Proses Biofilter Anaerob Dan Aerob.* www.enviro.bppt.go.id/~Kel-1/

Sardjoko. 1981. *Bioteknologi : Latar Belakang dan Penerapannya.*

Gramedia. Jakarta

Setiawan, Yuli. 27 Mei 2005. *Mengubah Limbah Ternak Jadi Energi.*

www.iatpi.org

Sriharjo, Sadono. 2001. *Sinergi Produksi Bersih Pada Peningkatan Daya*

Saing Industri. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, Vol.3, No.4

(Juli 2001), hal. 47-52 /HUMAS-BPPT/ANY

Suprihatin, Agung., Prihanto, Dwi., Gelbert, Michel. 1996. *Buku Panduan.*

PPPPT/VEDC. Malang

Suriawiria, H.Unus. 07 April 2005.. *Menuai Biogas dari Limbah.*

www.pikiran-rakyat.com

Suryandono, AG. 2004. *Identifikasi Laju Produksi Biogas pada*

Pengolahan Limbah Cair Tahu Menggunakan Anaerobic Baffled

Reactor (ABR). Jurusan TIP FTP UGM. Yogyakarta

Trismilah, R.D., Estui, W., Retno, W.K, Niknik,, N. dan Sumaryanto. 2001.

Pemanfaatan Limbah Cair Tahu sebagai Medium dan Pengaruhnya

terhadap Pertumbuhan Bakteri Penghasil Enzim Protease.

Prosiding Seminar Keanekaragaman Hayati dan Aplikasi

Bioteknologi Pertanian. BPPT. Jakarta

UMM. 2006. *Upaya Mengatasi Pencemaran Air Limbah Oleh Berbagai*

Jenis Dan Konsentrasi Zat Pengurai Limbah: Sebagai Sumber

Pembelajaran Tentang Bioremediasi Dengan Metode Bioteknologi

Di SMU. www.library.gunadharma.ac.id

Wagiman, Atris, S dan Jumeri. 2001. *Optimasi Kebutuhan Limpur Aktif Untuk Proses Pengolahan Limbah Cair Pada Sentra Industri Tahu "Ngudi Lestari"*. Lembaga Penelitian UGM. Jogjakarta

Wagiman., Suryandono, Ag. 2004. *Kajian Kombinasi Anaerobic Baffled Reactor (ABR) Dan Sistem Lumpur Aktif Untuk Pengolahan Limbah Cair Tahu*. Lembaga Penelitian UGM. Jogjakarta

Yusri. 2004. *Serbuk Pengurai Limbah Saluran Mampet*.

www.pintunet.com