

Bab 5. Konversi Biokimia Biomassa

5.1 Biometanasi

5.1.1 Apa itu biometanasi?

"Fermentasi metana" atau "pencernaan anaerobik" biasanya digunakan untuk menunjukkan "biometanasi". Biometanasi adalah proses mikroba yang kompleks dimana senyawa organik terdegradasi menjadi metana dan karbon dioksida oleh berbagai anaerob. Biogas ini memiliki nilai kalor rendah 20-25 MJ/m³-N (5.000~6.000 kcal/m³-N) dan dapat digunakan untuk bahan bakar setelah desulfurisasi hidrogen sulfida. Biometanasi digunakan sebagai teknik pemulihan biofuel dari biomassa dan perlakuan limbah biomassa. Limbah fermentasi dapat digunakan untuk pupuk cair dan bahan baku kompos.

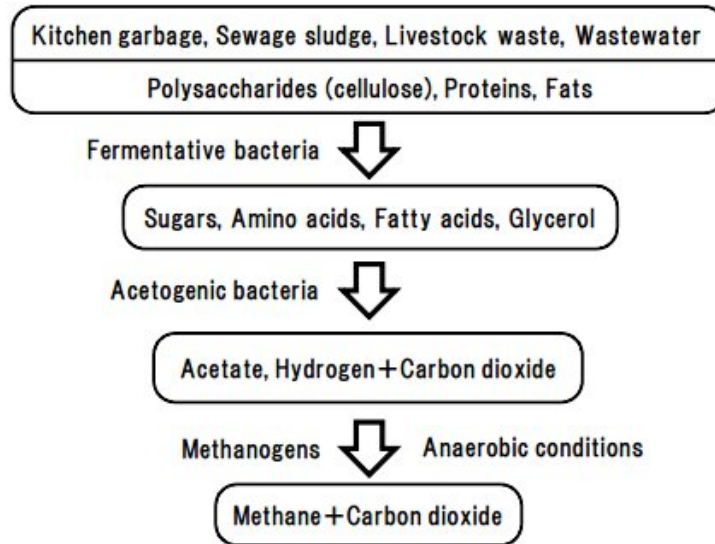
5.1.2 Ciri biometanasi

Pertama-tama, senyawa organik yang membusuk menjadi asam organik atau hidrogen dengan berbagai bakteri anaerob. Pada tahap akhir, asetat atau hidrogen dan karbon dioksida diubah menjadi metana. Biometanasi terjadi di bawah kondisi anaerobik, terutama, metanogen membutuhkan kondisi anaerobik mutlak untuk produksi metana. Biometanasi adalah proses mikrobiologis, karena itu, proses ini berlangsung di bawah suhu dan tekanan normal. Biometanasi dapat diterapkan untuk berbagai biomassa dibandingkan dengan fermentasi etanol karena kegiatan mikroflora kompleks.

5.1.3 Mekanisme biometanasi

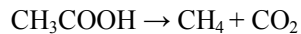
Ketika senyawa organik dipertahankan pada 50-70°C dan pH netral di bawah kondisi anaerobik, biometanasi secara spontan akan terjadi. Biogas sering dihasilkan dari bawah tanah TPA. Sampah dapur dan lumpur limbah telah digunakan sebagai substrat dari biometanasi. Limbah organik dari pabrik makanan yang mengandung gula dan pati juga telah digunakan sebagai substrat untuk biometanasi.

Biometanasi terdiri atas hidrolisis, asetogenesis dan metanogenesis. Gambar 5.1.1 menunjukkan garis besar biometanasi.

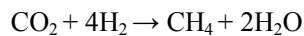


Gambar 5.1.1 Diagram skema biometanasi.

Polisakarida didekomposisi menjadi gula tunggal, protein menjadi asam amino, dan lemak menjadi asam lemak dan gliserol. Bakteri fermentasi contohnya adalah *Bacteroides spp.* dan *Clostridium spp.* Gula dan asam amino terdekomposisi menjadi asetat dan propionat oleh asidogens. Akhirnya, metanogen mengonversi asetat atau hidrogen dan karbon dioksida menjadi metana. Asidogenesis adalah proses yang kompleks dimana mikroflora anaerob bersama-sama mengurai senyawa organik menjadi asam organik molekul rendah. Asetat, laktat, suksinat, etanol, butanol, aseton dan sebagainya dapat diproduksi dari glukosa oleh asidogens. Dalam pengolahan air limbah, 70% metana dihasilkan dari asetat, dan 30% dihasilkan dari hidrogen dan karbon dioksida. Formula reaksi asetoklasik adalah sebagai berikut;



Formula reaksi hydrogenotropik adalah sebagai berikut;

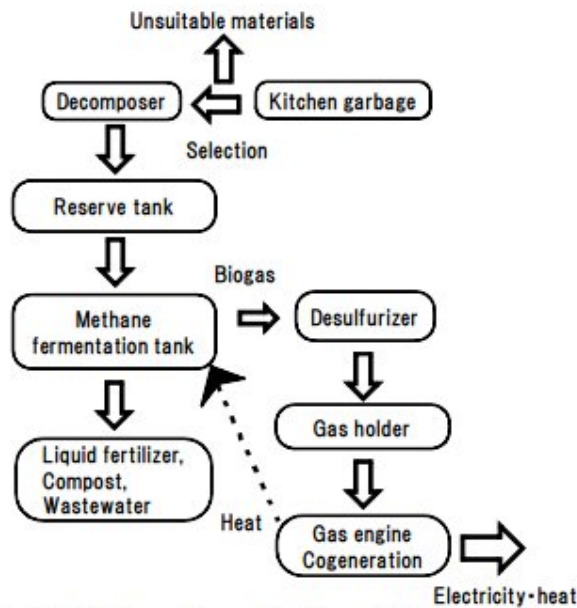


Metanogen merupakan anaerob yang dapat tumbuh dengan menggunakan asetat atau hidrogen dan dapat menghasilkan metana. Perwakilan metanogen diantaranya *Methanobacter spp.* dan *Methanosaeta spp.*

Metanogen bisa terbunuh oleh paparan oksigen, karena itu, pembentukan metana wajib membutuhkan kondisi anaerob. Analisis filogenetik menunjukkan bahwa metanogen ditempatkan dalam kelompok Archaea, dibedakan dari eukariota dan prokariota. Metanogen hanya dapat menggunakan hidrogen, format, asetat, 2-propanol, 2-buthanol, metilamin, metanol, metilmerkaptan untuk menghasilkan metana.

5.1.4 Status terkini

Biometanasi dikomersialisasikan untuk limbah makanan, limbah ternak, limbah lumpur, dan air limbah. Negara-negara Eropa telah mengembangkan teknologi biometanasi. Tanaman biogas telah secara bertahap meningkat di Jepang. Reaksi berlangsung pada suhu fermentasi yang tinggi, sedang, atau rendah, dan kadar organik mengklasifikasikan biometanasi dalam fermentasi basah dan kering. Sistem suhu tinggi mengungkapkan kinerja gasifikasi tinggi dibandingkan dengan suhu lainnya. Poin yang merugikan dari biometanasi adalah pencernaan rasio yang rendah, rasio penghilangan amonium dan fosfat yang rendah, waktu perlakuan yang lama, dan kebutuhan akan panas. Fermentasi limbah dan residu harus didaur ulang untuk pertanian sebagai pupuk organik karena biaya perlakuan yang tinggi. Perkembangan teknologi sedang dilakukan untuk mengatasi masalah ini.



Gambar 5.1.2 Aliran biometanasi sampah dapur.

Informasi Lebih Lanjut

Ahring, B. K., "Biometanasi I", Springer, (2003)

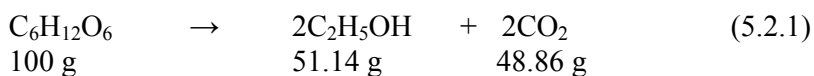
Nagai, S.; Ueki, K., "Anaerobic microbiology", Youkenndou, (1993) (dalam bahasa Jepang)

Speece, R. E., "Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters", Archae Pr, (1996)

5.2 Fermentasi Etanol

5.2.1 Lingkup umum

Dalam fermentasi etanol bahan sakarin seperti glukosa, fruktosa, dan sukrosa dimetabolisme oleh strain ragi melalui jalur glikolisis (Embden-Meyerhof Pathway) untuk menghasilkan etanol dan karbon dioksida pada kondisi anaerob (Persamaan (5.2.1)). Dalam reaksi ini dua molekul ATP dihasilkan dari satu molekul glukosa dan digunakan sebagai energi untuk pertumbuhan sel-sel ragi. Umat manusia telah lama mengenal dan memanfaatkan fermentasi etanol untuk pembuatan minuman beralkohol, pembuatan makanan fermentasi, roti dan sebagainya selama ribuan tahun. Pada periode abad pertengahan, orang datang untuk mengetahui bagaimana cara menyuling minuman keras. Etanol menjadi tersedia di bidang industri kimia, minuman dan industri makanan, penggunaan medis, serta bahan bakar, sejak kemajuan besar dicapai dengan teknologi fermentasi dan distilasi pada abad ke 19-20-an. Sejumlah besar bahan bakar etanol telah diproduksi dari jagung di Amerika Serikat dan dari tebu di Brazil untuk tujuan sebagai bahan bakar alternatif untuk bahan bakar fosil dan untuk mencegah pemanasan global, terutama setelah dua kali krisis minyak di tahun 1970-an. Penelitian dan pengembangan ekstensif sedang berlangsung di dunia teknologi untuk produksi etanol dari berbagai bahan selulosa yang tersedia dalam jumlah besar dan tidak bersaing dengan pemanfaatan sebagai makanan.



Fermentasi etanol adalah reaksi biologis pada suhu kamar dan pada tekanan atmosfer. *Saccharomyces cerevisiae* adalah ragi yang banyak digunakan untuk industri dan produksi bahan bakar etanol, dan memiliki kemampuan yang sangat baik dalam fermentasi etanol dan toleransi terhadap etanol. Strain ragi menghasilkan 51,14 g etanol dari 100 g glukosa menurut

persamaan (5.2.1). Dalam reaksi ini hampir 50% berat glukosa hilang sebagai karbon dioksida, tetapi sekitar 91% dari energi yang terkandung dalam glukosa (2,872 MJ/mol) dipertahankan dalam etanol. Oleh karena itu, fermentasi etanol adalah proses biologis yang sangat baik untuk mengonversi biomassa menjadi bahan bakar etanol. Sel-sel ragi pertama kali diisolasi dari biakan murni bir pada tahun 1883 di Denmark dan banyak pekerjaan yang dilakukan pada jalur metabolisme mereka saat fermentasi etanol. *S. cerevisiae* dapat memfermentasi gula termasuk glukosa, fruktosa, galaktosa, manosa, sukrosa, maltosa, kecuali pentosa seperti xilosa dan arabinosa. *Pichia stipitis* dan *Pachysolen tannophilus* dikenal sebagai ragi yang mampu memfermentasi pentosa, tetapi mereka tidak begitu toleran terhadap etanol seperti *S. cerevisiae*. Penelitian untuk perbaikan strain untuk membangun strain *S. cerevisiae* memiliki kemampuan untuk memfermentasi pentosa sedang banyak dilakukan di berbagai laboratorium.

Selain *S. cerevisiae*, *Zymomomas mobilis* adalah bakteri yang sangat baik untuk memfermentasi berbagai gula seperti glukosa, fruktosa dan sukrosa menjadi etanol. Hasil fermentasi dan tingkat fermentasi *Z. mobilis* seharusnya lebih baik daripada ragi *S. cerevisiae*, namun *Z. mobilis* tidak begitu toleran terhadap etanol sebagaimana *S. cerevisiae*. *Zymobacter palmae*, yang diisolasi pada tahun 1980 di Jepang, memiliki kemampuan fermentasi etanol sama dengan *Z. mobilis* dan urutan genom dasarnya telah ditemukan baru-baru ini. Peningkatan strain dari *Z. mobilis* dan *Z. Palmae* tentang fermentasi pentosa dan manosa telah berhasil dibuat di Jepang. Pentosa terkandung pada konsentrasi yang relatif tinggi dalam kayu keras dan tanaman herba, dan manosa adalah komponen karakteristik dari kayu lunak.

Strain DNA rekombinan dari *Escherichia coli* dan *Corynebacterium glutamicum* memiliki kemampuan fermentasi etanol telah dikembangkan melalui bioteknologi. Bakteri fermentasi etanol lainnya seperti bakteri asam hetero-laktat (*Lactobacillus*), bacteria pendegradasi selulosa, *Clostridium*, dan bakteri anaerob termofilik *Thermoanaerobacter* sejauh ini telah dikenal, tetapi mereka dapat menghasilkan etanol pada konsentrasi yang relatif rendah dan dengan produk sampingan seperti asam organik. Oleh karena itu, bakteri ini dianggap sulit untuk penggunaan di industri setidaknya untuk saat ini.

5.2.2 *Fermentasi etanol untuk bahan-bahan sakarin*

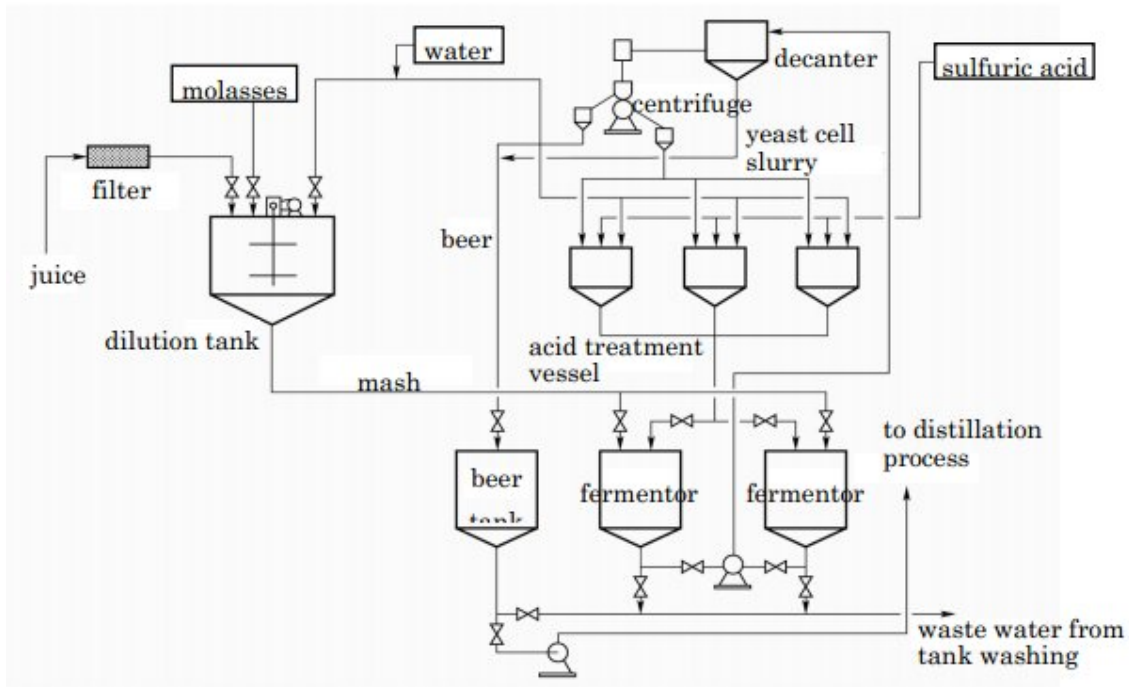
Bahan-bahan sakarin yang digunakan untuk produksi etanol pada skala besar adalah jus dan molase dari tebu dan gula bit. Molase adalah produk sampingan yang berupa biang cair terkonsentrasi setelah kristalisasi gula. Konsentrasi gula dari molase adalah sekitar 50% dan mengandung glukosa, fruktosa dan sukrosa sebagai komponen gula utama. Bahan-bahan sakarin ini adalah substrat yang baik untuk fermentasi etanol oleh ragi dan *Zymomonas*. Banyak jus tebu digunakan untuk produksi etanol di Brazil dan India.

Proses fermentasi etanol yang populer di Brazil adalah fermentasi kontinyu atau semi-kontinyu yang disebut proses Melle-Boinot dimana sel-sel ragi dipulihkan dari bir melalui sentrifus dan didaur ulang ke tangki fermentasi setelah sterilisasi dari kontaminasi bakteri dengan asam sulfat encer pada pH 3. Fermentasi etanol pada konsentrasi sel ragi yang tinggi dapat membuat bir yang mengandung etanol dari 6 sampai 8% dari sari tebu (konsentrasi gula 11-17%) dalam waktu sekitar 15 jam periode fermentasi. Molase digunakan untuk fermentasi setelah dua kali pengenceran atau pencampuran dengan jus tebu atau jus bit.

Ketika hasil fermentasi adalah 82% (berdasarkan gula total), dan konsentrasi gula molase adalah 55%, jumlah molase yang diperlukan untuk menghasilkan 1 m³ (kL) etanol 95% adalah 3,3 t-basah.

Bahan-bahan sakarin yang unik adalah whey susu dan molase jeruk. Dalam industri susu Selandia Baru, misalnya, sejumlah besar whey susu yang mengandung sekitar 4% laktosa dibuang. Mereka menggunakan limbah whey untuk fermentasi etanol untuk memulihkan nilai tambah produk sampingan dan untuk mengurangi BOD.

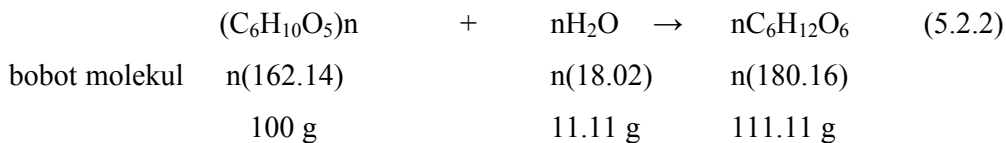
Sejumlah besar kulit jeruk dibuang dalam pembuatan jus jeruk. Jus sekunder dari kulit jeruk mengandung sekitar 8% gula dan komponen pahit terkonsentrasi pada molase jeruk dan konsentrasi gula lebih dari 40% untuk produksi etanol.



Gambar 5.2.1 Fermentasi etanol melalui proses Melle-Boinot (Saiki, 2007).

5.2.3 Fermentasi etanol dari pati

Pati merupakan polimer dari glukosa di mana unit glukosa terhubung satu sama lain melalui ikatan α -1,4 dan α -1,6. Bahan bertepung pertama-tama dihidrolisis menjadi glukosa dengan menggunakan enzim amilase (Persamaan (5.2.2)).



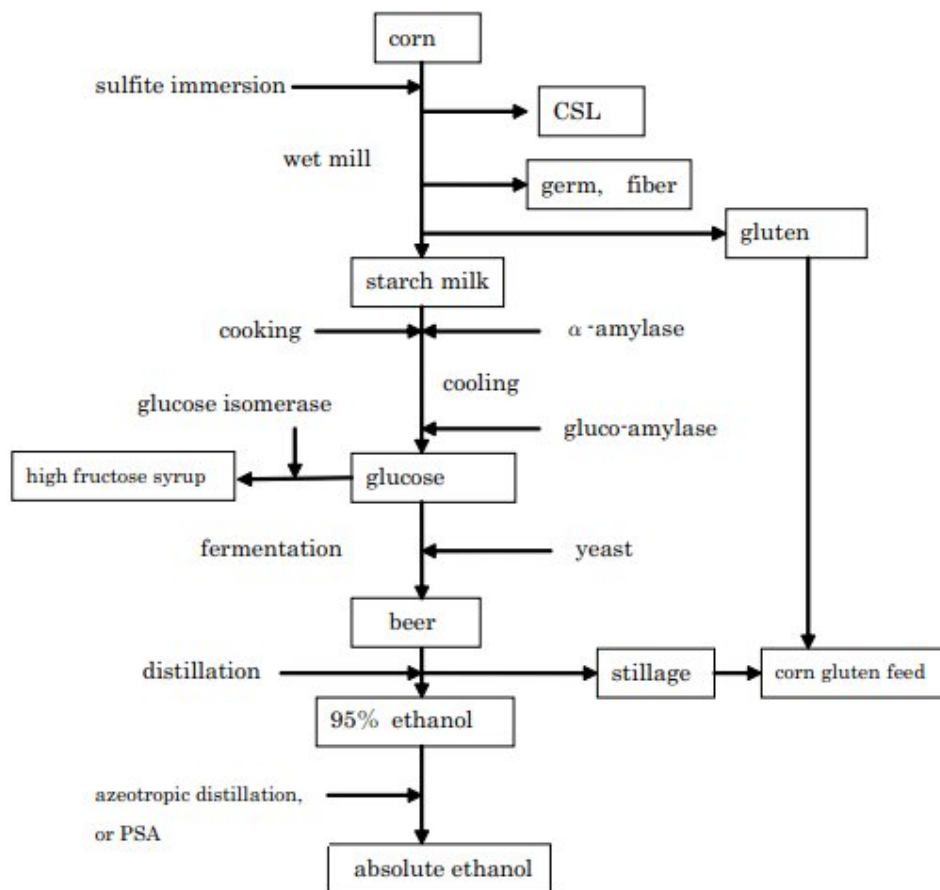
Bahan bertepung pertama-tama dimasak pada suhu antara 100 dan 130°C dan kemudian dihidrolisis menjadi glukosa dengan menggunakan α -amilase dan gluco-amilase.

Sejumlah besar etanol diproduksi dari jagung di Amerika Serikat dan dari ubi jalar di Cina.

Prosedur memasak dengan suhu rendah untuk produksi etanol dari ubi jalar yang ada di Jepang sampai tahun 1990 dijelaskan di bawah ini. Ubi jalar mentah ini pertama dihancurkan oleh hammer-mill dimasak pada 80-90°C selama 60 menit, ditambah dengan α -amilase untuk

mencairkan pati dan untuk mengurangi viskositas, dan kemudian didinginkan sampai suhu sekitar 58°C. Pati cair dihidrolisis menjadi glukosa dihidrolisis selama dua jam oleh gluko-amilase. Konsentrasi Glukosa bubur disesuaikan di sekitar 15%. Bir fermentasi dengan etanol sekitar 8% vol diperoleh setelah empat hari fermentasi secara batch pada 30-34°C. Ketika nilai pati ubi jalar sebesar 24,3% (27% setara glukosa), dan hasil fermentasi sebesar 92%, jumlah ubi jalar yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 m³ (kL) etanol 95% adalah 6.03 t-basah.

Bahan bakar etanol di Amerika Serikat sebagian besar diproduksi dari jagung. Dalam proses secara basah jagung direndam dalam larutan encer sulfit, difraksinasi menjadi pati, kecambah, gluten dan serat. Fraksi pati dihidrolisis menjadi glukosa oleh amilase setelah pemasakan dan kemudian difermentasi oleh ragi. Salah satu proses fermentasi yang populer adalah proses fermentasi kontinyu dengan beberapa tangki fermentasi yang terhubung secara seri dimana sel-sel ragi didaur ulang melalui mesin pemisah sehingga menghasilkan tingkat fermentasi yang tinggi. Proses batch tradisional juga dipraktikkan di beberapa pabrik ethanol. Konsentrasi akhir etanol dari bir fermentasi rata-rata antara 8 sampai 11 vol%. Proses basah konversi jagung menjadi etanol ditunjukkan pada Gambar 5.2.2. Ketika nilai pati sebesar 63% (70% setara glukosa), dan hasil fermentasi 90%, jumlah jagung yang diperlukan untuk menghasilkan 1 m³ (kL) etanol 95% adalah sekitar 2,4 t-basah.



Gambar 5.2.2. Proses produksi etanol dan sirup berkadar fruktosa tinggi dari jagung. (Dimodifikasi dari (Elander, 1996)).

5.2.4 Fermentasi etanol dari lignoselulosa

Biomassa lignoselulosa umumnya terdiri atas selulosa, hemiselulosa dan lignin (Tabel 5.2.1). Sebelum fermentasi etanol, biomassa harus menjalani pra-perlakuan dengan asam atau basa, dan/atau dengan selulase agar terhidrolisa menjadi larutan gula.

Tabel 5.2.1. Komposisi dari berbagai biomasa (%)

	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin
Kayu lunak	43	28	29
Kayu keras	43	35	22
Jerami padi	38	25	12
Kertas kantor	69	2	11

(a) Proses Asam sulfat pekat

Proses dari Arkenol Co Ltd (AS) telah dimodifikasi dan ditingkatkan di proyek NEDO antara tahun 2001 dan 2005. Asam sulfat pekat disempatkan pada serpihan kayu (kelembaban sekitar 15%) yang kemudian dibuat adonan dengan baik pada suhu kamar. Selama pembuatan adonan, struktur dari selulosa menjadi tidak mengkristal. Konsentrasi asam sulfat kemudian disesuaikan pada 20 sampai 30% dengan menambahkan air, dan bahan kayu dibiarkan pada suhu sekitar 90°C selama 10 sampai 15 menit untuk hidrolisis. Setelah fraksi padat dikeluarkan melalui filtrasi, komponen gula dipisahkan dari asam pada kromatografi penukar ion. Larutan Gula yang mengandung heksosa dan pentosa difermentasi oleh ragi atau strain *Zymomonas* yang direkayasa genetika. Asam sulfat dikonsentrasikan lagi untuk penggunaan kembali.

(b) Proses Asam Sulfat Encer

Fraksi hemiselulosa didegradasi menjadi gula yang terutama terdiri atas pentosa dan beberapa heksosa melalui perlakuan asam sulfat encer (0,5-1,0%) pada 150-180°C, dan sekitar 1 MPa (10 atm). Fraksi residu yang mengandung selulosa dan lignin diperlakukan lagi dengan konsentrasi yang sama dari asam encer tersebut pada 230-250°C dan pada 3-5 MPa (30-50 atm) untuk menghasilkan glukosa. Hasil gula dari perlakuan pertama dan kedua masing-masing dilaporkan sekitar 90% dan 50-60%. Di pabrik etanol "Bioetanol Jepang Kansai" (Osaka, Jepang), yang telah dioperasikan sejak Januari, 2007, larutan gula hanya dari fraksi hemiselulosa kayu dilaporkan dikonversi menjadi etanol melalui fermentasi oleh *E. coli* yang dimodifikasi secara genetik.

Di Amerika Serikat, penelitian kelompok termasuk NREL telah ditantang untuk meningkatkan aktivitas selulase untuk keperluan industri dalam proses asam sulfat encer. Target mereka adalah, dilaporkan, untuk memulai produksi bioetanol dari biomassa seperti brangkasan jagung pada tahun 2013.

Informasi Lebih Lanjut

9th *Alcohol Handbook*, Japan Alcohol Association Ed., Gihodo Shuppan Co. Ltd, 1997

Elander, R. T.; Putsche, V/ L/, in *Handbook on Bioethanol*, Wyman, C. E. Ed., Taylor & Francis Pub. 1996, pp329-350

Saiki, T. in *Biomass Handbook*, Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp157-165, (dalam bahasa Jepang)

Saiki, T.; Karaki, I.; Roy, K., in *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol.V, *Energy and Biomass Engineering*, Kitani, O. Ed., American Society of Agricultural Engineers, 1999, pp139-164

Saiki, T., in *Bioethanol Production Technology*, Japan Alcohol Association Ed., Kogyochosakai 2007, pp75-101. (dalam bahasa Jepang)

Yamada, T., in *Bioethanol Production Technology*, Japan Alcohol Association Ed., Kogyochosakai 2007, pp102-126. (dalam Bahasa Jepang)

5.3 Fermentasi Aseton-Butanol

5.3.1 Apa itu fermentasi aseton-butanol?

Fermentasi aseton-butanol adalah reaksi dimana aseton dan butanol dihasilkan dari glukosa dengan menggunakan *Clostridium*, bakteri anaerobik ketat. Selanjutnya, etanol juga diproduksi. Oleh karena itu, fermentasi aseton-butanol juga disebut sebagai fermentasi ABE. *Clostridium* tersebar luas di tanah, dan mengeluarkan amilase, xilanase, protease dan lipase dari sel. Ada dua jenis strain yang digunakan dalam fermentasi aseton-butanol. Salah satunya adalah jenis Weizmann yang menghasilkan butanol dari pati, dan yang lainnya adalah jenis Saccaro yang menghasilkan butanol dari sukrosa.

5.3.2 Karakteristik fermentasi aseton-butanol

Fermentasi aseton-butanol memiliki sejarah panjang dan merupakan suatu teknologi industri. Fermentasi aseton-butanol digunakan untuk memproduksi aseton sebagai bahan baku bubuk tanpa asap dalam Perang Dunia I dan butanol untuk bahan bakar pesawat tempur dalam Perang Dunia II. Setelah Perang Dunia II, fermentasi aseton-butanol tidak lagi digunakan karena pengembangan kimia minyak bumi. Baru-baru ini, butanol ditinjau sebagai biofuel.

5.3.3 Reaksi fermentasi aseton-butanol

Strain bakteri yang digunakan untuk produksi industri butanol adalah bakteri penghasil aseton-butanol dan bakteri penghasil butanol-isopropanol yang menghasilkan butanol dan isopropanol, produk sebelum menjadi aseton. Jalur reaksi ditunjukkan pada Gambar 5.3.1. Glukosa didekomposisi menjadi piruvat, asetil-KoA, dan asetoasetil-KoA melalui jalur EMP,

dan akhirnya dihasilkan aseton, butanol, isopropanol dan etanol. Persamaan stokiometri fermentasi aseton-butanol ditampilkan dalam Persamaan 5.3.1.



Dalam fermentasi aseton-butanol, butanol secara bertahap terakumulasi dan menyebabkan penghambatan produksi di lebih dari 3 kg/m³ (g/L) dari konsentrasi butanol. Ketika penghambatan produksi terjadi, pertumbuhan sel-sel bakteri, konsumsi substrat, dan akumulasi produk ditekan. Konsentrasi akhir butanol mencapai sekitar 30 kg/m³ (g/L). Setelah fermentasi, larutan kultur disuling dan produk dipisahkan oleh perbedaan titik didihnya, misalnya aseton (TD 56,3°C), etanol (TD 78,3°C) dan butanol (TD 117°C).

5.3.4 Efisiensi energi fermentasi aseton-butanol.

Dari Persamaan. 5.3.1, dalam fermentasi aseton-butanol 60 mol butanol (170 MJ), 30 mol aseton (54 MJ), 10 mol etanol (14MJ) dan 120 mol hidrogen (34 MJ) dihasilkan dari 95 mol glukosa (273 MJ). Hampir semua energi dalam glukosa dapat dipindahkan kebutanol, aseton, etanol dan hidrogen.

5.3.5 Produk fermentasi aseton-butanol

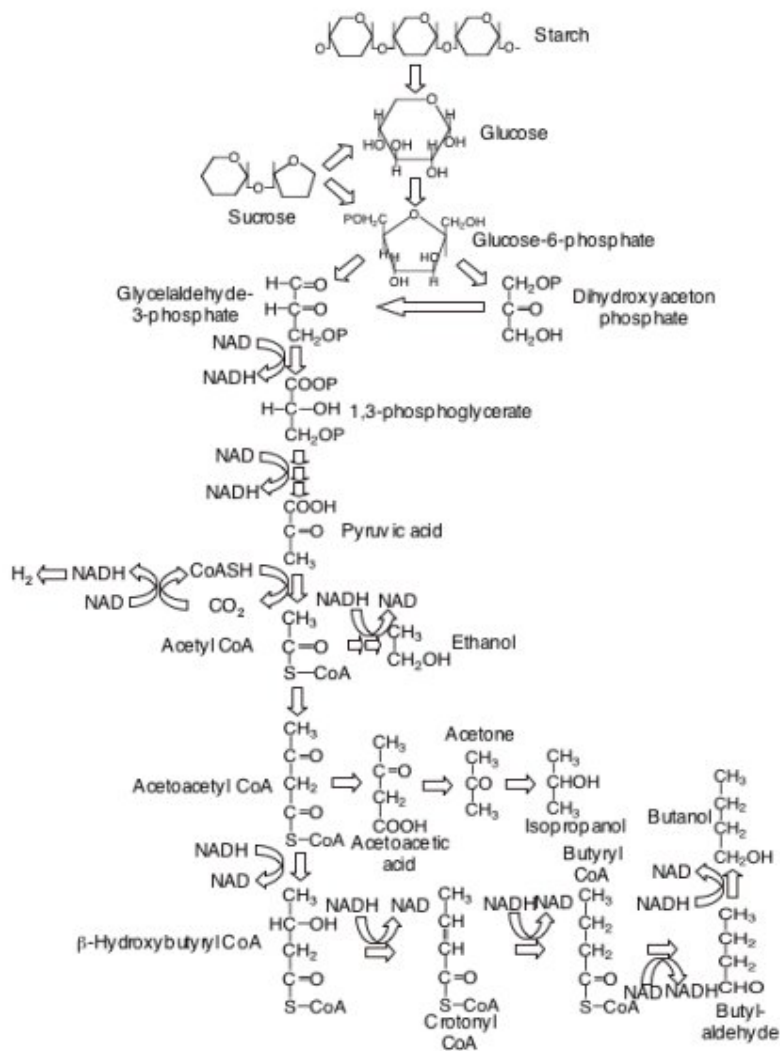
Fermentasi aseton-butanol diindustrialisasi untuk pasokan bahan baku bubuk tanpa asap dan pesawat tempur. Saat ini, aseton dan butanol disintesis di industri perminyakan. Biofuel, aditif bensin atau diesel terbaru sekarang mendapat banyak perhatian di seluruh dunia. Butanol dapat ditambahkan ke keduanya baik bensin maupun diesel dan memiliki afinitas lebih untuk bensin daripada etanol. Oleh karena itu, butanol akan menjadi biofuel yang menjanjikan.

Informasi Lebih Lanjut

Crabbe, E.; N-Hipolito, C.; Kobayashi, G.; Sonomoto, K.; Ishizaki, A., Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanal extraction and fuel properties, *Process Biochim.*, **37**, 65-71 (2001)

Ishizaki, A.; Michiwaki S.; Crabbe, E.; Kobayashi, G.; Sonomoto, K.; Yoshino, S., Extractive acetone-butanol-ethanol fermentation using methylated crude palm oil as extractant in batch culture of *Clostridium saccharoperbutyl acetonicum* N1-4 (ATCC13564), *J. Biosci, Bioeng.*, **87**, 352-356 (1999)

Lee, T. M.; Ishizaki, A.; Yoshino, S.; Furukawa, K., Production of acetone, butanol and ethanol from palm oil waste by N1-4, *Biotechnol. Letters*, **17**, 649-654 (1995)



Gambar 5.3.1. Jalur reaksi fermentasi aseton-butanol.

5.4 Fermentasi Hidrogen

5.4.1 Apa itu fermentasi hidrogen?

Fermentasi anaerobik adalah reaksi dimana mikroorganisme anaerobik secara oksidatif mengurai bahan organik untuk mendapatkan energi dalam kondisi anaerobik. Kita sebut reaksi fermentasi ini fermentasi hidrogen jika hidrogen adalah produk akhir proses. Dalam proses fermentasi hidrogen, beberapa bahan organik dan alkohol diproduksi bersama dengan hidrogen. Meskipun akseptor elektron terakhir adalah oksigen atau bahan anorganik dalam respirasi, bahan organik yang terurai dan karbon dioksida dll dari bahan substrat adalah produk akhir dalam fermentasi. Sebagai contoh, produk akhir adalah etanol dan karbon dioksida dari glukosa selama fermentasi etanol. Sementara sintesis ATP digabungkan dengan rantai transfer elektron dalam respirasi, ATP dihasilkan dalam reaksi pada tingkat substrat dalam fermentasi. Energi yang diperoleh dari fermentasi lebih kecil daripada yang dari respirasi untuk jumlah substrat yang sama.

5.4.2 Karakteristik fermentasi hidrogen

Peran dari produksi hidrogen adalah untuk mengatur tingkat oksidasi-reduksi dalam sel bakteri dengan mengubah kelebihan tenaga pengurangan menjadi hidrogen. Ada bakteri yang dapat mengambil dan memanfaatkan hidrogen tersebut. Dalam rangka meningkatkan hasil hidrogen, reaksi sebaliknya konsumsi hidrogen harus ditekan. Umumnya, diperlukan perlakuan air limbah dari proses fermentasi hidrogen, karena proses fermentasi hydrogen juga memproduksi beberapa bahan organik.

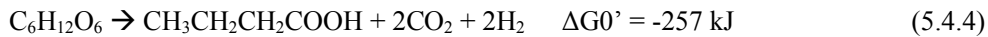
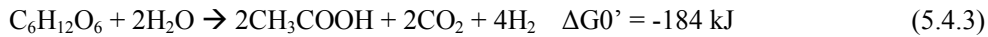
5.4.3 Reaksi fermentasi hidrogen

Bakteri penghasil hidrogen diklasifikasikan menjadi 2 jenis oleh perbedaan dalam reaksi enzim. Salah satunya adalah bakteri dengan hidrogenase, dan yang lainnya dengan nitrogenase.

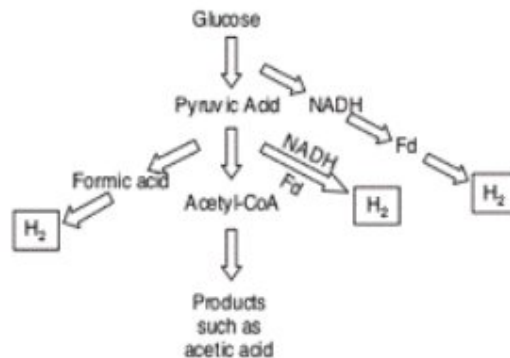


X: pembawa elektron, Pi: fosfat anorganik

Seperti ditunjukkan pada reaksi di atas, hidrogenase mengkatalisis reaksi kebalikan dari evolusi dan penyerapan hidrogen. Di sisi lain, reaksi oleh nitrogenase membutuhkan energi (ATP). Pada fermentasi anaerob, reaksi oleh hidrogenase utamanya diperiksa. Penggambaran reaksi fermentasi hidrogen adalah sebagai berikut:



Gambar 5.4.1 menunjukkan jalur fermentasi hidrogen. Hidrogen terbentuk dari hidrogenase baik melalui NADH dan ferredoxin, melalui ferredoxin saja, atau melalui format-liase. Dalam proses fermentasi hidrogen, hidrogen diproduksi dari dekomposisi oksidatif dari substrat organik. Oleh karena itu, fermentasi hidrogen digunakan dalam perlakuan limbah dan air limbah. Dalam kasus tersebut, perlakuan berikut seperti fermentasi metana atau metode lumpur aktif diperlukan, karena proses fermentasi hidrogen menyertai produksi asam organik. Laju reaksi fermentasi hidrogen cepat dibandingkan dengan fermentasi metana. Hal ini mungkin menjanjikan pada metode pra-perlakuan fermentasi metana.

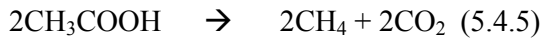


Gambar 5.4.1. Jalur fermentasi hidrogen.

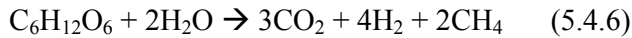
5.4.4 Efisiensi energi fermentasi hidrogen

Karena proses fermentasi hidrogen menyertai produksi asam organik, perlu untuk mempertimbangkan gabungan sistem total dengan metode perlakuan berikutnya seperti fermentasi metana. Dalam proses fermentasi hidrogen, 4 mol hidrogen secara teoritis dihasilkan dari 1 mol glukosa (Persamaan (5.4.3)). Ketika kemudian membentuk asetat dan

digunakan untuk fermentasi metana dan diubah menjadi metana, reaksinya ditunjukkan sebagai berikut:



Reaksi total metana-hidrogen fermentasi dua-tahap ditunjukkan sebagai berikut:



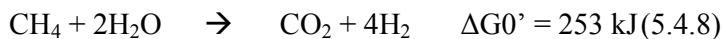
Jumlah nilai panas yang tinggi dari produk ini adalah 2,924 MJ (2924 kJ). Di sisi lain, pada fermentasi metana saja, reaksinya ditunjukkan sebagai berikut:



Nilai kalor tinggi produk dari Persamaan (5.4.7) adalah 2,671 MJ (2671 kJ). jelas terlihat dari hasil ini bahwa hasil energi dari fermentasi hidrogen-metana meningkat 10% dibandingkan dengan fermentasi metana saja.

5.4.5 Produk fermentasi hidrogen

Produk gas berevolusi dari fermentasi hidrogen dan metana mungkin dapat digunakan untuk bahan bakar sel yang memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin gas dan mesin gas. Metana dari fermentasi metana harus diubah menjadi hidrogen untuk bahan bakar sel.



Karena Persamaan 5.4.8 adalah reaksi endotermik, pasokan energi dibutuhkan untuk melanjutkan reaksi. Umumnya, gas metana diubah menjadi gas hidrogen dengan katalis nikel pada 650-750°C. Di sisi lain, dalam fermentasi hidrogen, hasil energi lebih tinggi dari fermentasi metana dan konversi katalitik dari metana tidak diperlukan untuk membuat gas hidrogen menjadi bahan bakar sel.

Informasi Lebih Lanjut

- Noike, T.; Mizuno, O., Hydrogen fermentation of organic municipal wastes, *Water Sci. Technol.*, **42**, 155-162(2000)
- Rachman, M. A.; Nakashimada, Y.; Kakizono, T.; Nishio, N., Hydrogen production with high yield and high evolution rate in a packed-bed reactor, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **49**, 450-454(1998)
- Tanisho, S.; Tu, H.-P.; Wakao, N. Fermentative hydrogen evolution from various substrates by *Enterobacter aerogenes*, *Hakkokogaku*, **67**, 29-34(1989)
- Taguchi, F.; Yamada, K.; Hasegawa, K.; Taki-Saito, K.; Hara, K. Continuous hydrogen production by *Clostridium* sp. No.2. from cellulose hydrolysate in an aqueous two-phase system, *J. Ferment. Bioeng.*, **82**, 80-83(1996)
- Ueno, Y.; Otsuka, S.; Morimoto, M.; Hydrogen production from industrial waste-water by anaerobic microflora in chemostat culture, *J. Ferment. Bioeng.*, **82**, 194-197(1996)

5.5 Fermentasi Asam laktat

5.5.1 Apa itu fermentasi asam laktat?

Asam laktat memiliki gugus alkohol (OH) dan karboksilat (COOH) di dalam molekulnya. Karena termasuk karbon kiral, maka memiliki dua isomer kiral, D-asam laktat dan L-asam laktat. Baru-baru ini, permintaan poli-laktat, plastik biomassa, meningkat, dan permintaan asam laktat juga meningkat sebagai bahan baku poli-laktat. Kemudian asam laktat dengan hampir 100% kemurnian optik sangat diperlukan. Umumnya, asam laktat diproduksi melalui sintesis kimia atau oleh fermentasi mikroba. Dalam sintesis kimia, biasanya digunakan metode yang menggunakan hidrolisis lakto-nitril, menghasilkan D-asam laktat dan L-asamlaktat setengah demi setengah dimana kemurnian optiknya nol. Jadi asam laktat untuk produksi poli-laktat selalu diproduksi melalui fermentasi. Asam laktat dapat dihasilkan baik oleh bakteri ataupun jamur. Di sini difokuskan pada fermentasi asam laktat dengan bakteri.

5.5.2 Bakteri asam laktat

Bakteri asam laktat memproduksi banyak asam laktat dari beberapa jenis gula. Mereka adalah gram positif tipe batang atau bakteri bulat yang dapat tumbuh di bawah kondisian aerobik. Mereka tidak menunjukkan mobilitas dan negatif pada reaksi katalitik. Mereka tidak membentuk spora. Mereka hanya menggunakan gula sebagai sumber energi untuk menghasilkan asam laktat, dan mengonversi lebih dari 50% dari gula yang dikonsumsi. Ada

empat kelompok dalam spesies bakteri yang dapat memenuhi kondisi yang disebutkan di atas: *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, dan *Streptococcus*. Bakteri asam laktat dapat tumbuh dengan tingkat pertumbuhan yang lebih tinggi dan menghasilkan asam laktat dengan produktivitas yang lebih tinggi. Karena mereka membutuhkan banyak nutrisi termasuk asam amino dan vitamin, Pembuatan komposisi cairan fermentasi tidaklah sederhana. Kita dapat mengklasifikasikan fermentasi asam laktat menjadi dua kelompok, fermentasi asam homo-laktat dan fermentasi asam hetero-laktat. Dalam fermentasi homo dua mol asam laktat dan dua mol ATP dapat dihasilkan dari satu mol mono-sakarida dengan hasil hampir 100% laktat. Di sisi lain, dalam fermentasi hetero, dihasilkan asam laktat dan senyawa lain; diklasifikasikan menjadi dua kelompok: 1) satu menghasilkan asam laktat, etanol dan karbon dioksida. 2) satu menghasilkan satu mol asam laktat dan 1,5 mol asam asetat dari satu mol mono-sakarida. Bakteri asam laktat memiliki kedua tipe D dan tipe L atau kedua jenis tipe D atau tipe L dari laktat dehidrogenase. Jadi D-asam laktat dan (atau) L-asam laktat dapat diproduksi oleh bakteri. Kebanyakan dari bakteri asam laktat memiliki enzim yang merasemat asam laktat yang dihasilkan, mempengaruhi kualitas kiral dari asam laktat. *Laktobasilus rhamnosus* hanya dapat menghasilkan L-asam laktat dengan hampir 100% kemurnian optik, yang digunakan sebagai bahan baku untuk produksi poli-laktat.

5.5.3 Sumber daya biomassa untuk fermentasi asam laktat

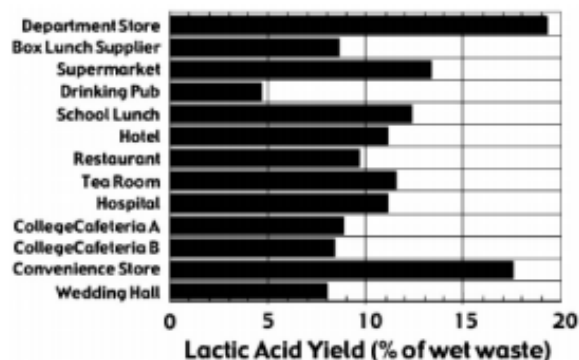
Glukosa merupakan substrat utama untuk fermentasi asam laktat, yang biasanya diperoleh dari hidrolisis pati. Pati sekarang diperoleh dari tanaman. Namun, kadang-kadang kita khawatir tentang persaingan antara energi atau bahan dan makanan, seperti diklaim pada produksi etanol dari sumber daya biomassa. Jadi biomassa selulosa lunak seperti sekam padi yang tidak digunakan saat ini diharapkan untuk bisa menjadi sumber daya biomassa. Bagaimanapun biomassa yang tidak digunakan seperti ini memiliki kualitas yang rendah dan itulah sebabnya sampai saat ini belum digunakan. Jadi beberapa kondisi harus dipertimbangkan untuk pemanfaatannya dalam fermentasi. Pertama, diperlukan pasokan yang konstan dan stabil dari biomassa. Selanjutnya, gula harus dapat diperoleh dengan mudah dengan energi sesedikit mungkin. Tentu saja, diperlukan teknologi yang lebih efektif dan canggih untuk fermentasi, dan terlebih lagi, penting juga untuk memecahkan masalah yang menyertai terkait dengan transportasi dan penyimpanan biomassa dalam hal energi, biaya, dll.

5.5.4 Pemanfaatan biomassa yang tidak terpakai dari industri kelapa sawit

Kelapa sawit adalah salah satu dari tiga minyak nabati utama di dunia. Kelapa sawit dapat dipanen sepanjang tahun hanya disekitar khatulistiwa. Dalam operasi pabrik untuk produksi minyak, lebih dari 10 Tg (Mt) biomassa yang tidak terpakai diperoleh sebagai produk samping seperti biasa. Karena pabrik-pabrik pengolahan kelapa sawit sangat besar, lebih dari beberapa puluh Gg (ribu ton) dari biomassa yang tidak terpakai yang seragam dapat dikumpulkan terus-menerus sepanjang tahun. Selain itu, baru-baru ini musim penanaman kembali pohon kelapa sawit tiba dan sejumlah besar batang kelapa sawit akan terbuang. Baru-baru ini, ditemukan bahwa ada banyak glukosa di dalam batang dan sirup glukosa dapat dengan mudah diperoleh dengan memerasnya seperti pada pengolahan tebu.

5.5.5 Fermentasi asam laktat dari sampah dapur

Jepang adalah negara yang sempit dan memiliki kepadatan penduduk yang tinggi. Itulah sebabnya kami tidak dapat menggunakan metode pembuangan yang sederhana untuk pengolahan sampah di Jepang. Jadi kita memiliki sekitar dua ribu tungku untuk membakar sampah. Setiap hari, sampah dikumpulkan di tungku dan dibakar untuk mendapatkan energi panas, yang sebagiannya digunakan untuk pembangkit listrik. Oleh karena itu, uap yang tidak terpakai dengan tekanan rendah tersedia. Sampah dapur terdiri dari 30% dari total sampah di Jepang. Terutama, sampah dapur dari sektor bisnis termasuk supermarket dan toko dapat dengan mudah dipisahkan dari yang lain. Sampah dapur Jepang dapat menjadi sumber yang baik untuk gula karena setengah dari padatan dalam sampah dapur terdiri dari pati, meskipun komposisi dari sampah dapur berubah setiap harinya. Jadi sampah dapur berisi berbagai nutrisi termasuk vitamin dan itu baik untuk fermentasi asam laktat. Gambar 5.5.1 menunjukkan hasil asam laktat dari sampah dapur dalam fermentasi asam laktat setelah perlakuan enzimatik dengan glukoamilase menggunakan *Lactobacillus rhamnosus*. Umumnya, sampah dapur mengandung kelembaban sebesar 80% dan menunjukkan bahwa sekitar 10% dari hasil asam laktat yang ditunjukkan pada gambar seharusnya cukup tinggi.



Gambar 5.5.1 Hasil asam laktat dari fermentasi asam laktat dari sampah dapur.

5.5.6 Pemurnian asam laktat

Asam laktat untuk poli-laktat diminta untuk menjamin tidak hanya kemurnian optik cukup tinggi, tetapi juga kemurnian cukup tinggi sebagai asam laktat. Dalam fermentasi asam laktat, setiap kelas teknologi pemurnian yang lebih tinggi untuk menghasilkan asam laktat murni diperlukan karena cairan fermentasi mengandung berbagai komposisi. Biasanya teknologi distilasi diadopsi untuk tujuan ini: Dalam pemurnian asam laktat dari fermentasi sampah dapur, butil-laktat dipisahkan dengan distilasi setelah esterifikasi asam laktat dengan butanol. Selain itu, amonia dapat dipulihkan dalam reaksi esterifikasi, yang dapat digunakan lagi untuk penyesuaian pH dalam fermentasi. Namun, dalam proses ini lebih banyak energi akan diperlukan untuk menghilangkan air untuk mendorong reaksi esterifikasi. Ketika energi akan dipasok dari sumber daya fosil, maka secara ekologis maupun ekonomis tidak cocok. Pemanfaatan energi panas yang tidak terpakai dari tungku bisa menjadi solusi yang dapat diterima.

Informasi Lebih Lanjut

Morichi, T. Physiology and metabolism of lactic acid bacteria: *Biseibutsu* **6**(1), 27-34 (1990) (dalam bahasa Jepang)

Sakai, K.; Murata, Y.; Yamazumi, H.; Tau, Y.; Mori, M.; Moriguchi M.; Shirai, Y. Selective proliferation of lactic acid bacteria and accumulation of lactic acid during open fermentation of kitchen refuse with intermittent pH adjustment: *Food Science and Technology Research*, **6**, 140-145 (2000)

Hassan, M. A.; Nawata, O.; Shirai, Y.; Nor'Aini A. R.; Phang L. Y.; Ariff, B. A.; Abdul Karim, M. I. A Proposal for Zero Emission from Palm Oil Industry Incorporating the Production of Polyhydroxyalkanoates from Palm Oil Mill Effluent: *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **35** (1) 9-14 (2002)

Sakai, K.; Taniguchi, M.; Miura, S.; Ohara, H.; Matsumoto, T.; Shirai, Y. Novel process of poly-L-lactate production from municipal food waste: *Journal of Industrial Ecology*, **7**(3, 4), 63-74 (2004)

Mori, T.; Kosugi, A.; Murata, Y.; Tanaka, R.; Magara, K. Ethanol and Lactic Acid Production from Oil Palm Trunk: Proceedings of Annual meeting of the Japan Institute of Energy, **16**, 196-197 (2007) (dalam bahasa Jepang)

5.6 Silase

5.6.1 Apa itu silase?

Silase sekarang pada umumnya adalah pakan ternak dan domba yang diawetkan di banyak negara. Silase dihasilkan oleh fermentasi terkontrol dari tanaman dengan kelembaban tinggi. Silase adalah suatu proses fermentasi yang terdiri atas tanaman hijau dan rumput dalam silo (Gambar 5.6.1). Jenis-jenis silo dimana petani dapat memilih untuk memfermentasi panen mereka sangat bervariasi. Untuk kenyamanan, silo komersial dapat diklasifikasikan ke dalam kategori utama: tumpukan atau penjepit tanpa dinding penahan, menara, bunker, vakum, sosis plastik dan bal gulungan. Dibandingkan dengan jerami, asupan pakan, pencernaan dan nilai gizi silase sangat baik. Silase dapat dibuat dari banyak produk damping dari tanaman dan makanan, dan bahan lainnya.



Gambar 5.6.1. Pemetongan pakan (kiri) dan silo tumpukan (kanan).

5.6.2 Pembuatan silase

Silase berasal dari Mesir kuno. penelitian silase pada mekanisme fermentasi telah membuat kemajuan pesat pada abad ke-20. Silase dapat dibuat dari tanaman hijau dan rumput pada tahap optimum pertumbuhan dengan kelembaban yang cocok, sekitar 50% sampai 70%. Bahan pakan dikumpulkan, dirajang menjadi panjang sekitar 10 sampai 20 mm dan dikemas ke dalam silo. Pemanen mekanis digunakan untuk mengumpulkan tanaman dan memotong bahan makanan ternak, dan menyimpannya dalam truk atau gerobak. Pemanen hijau ini dapat berupa ditarik traktor atau berjalan sendiri. Pemanen meniup silase ke gerobak melalui saluran di bagian belakang atau sisi mesin. Inokulan LAB digunakan untuk membuat silase berkualitas tinggi (Gambar 5.6.2).



Gambar 5.6.2. Bentuk sel (kiri) dan inokulan (kanan) dari bakteri asam laktat "Chikuso 1".

5.6.3 Fermentasi silase

Pengawetan tanaman hijau sebagai silase tergantung pada produksi asam yang cukup untuk menghambat aktivitas mikroorganisme yang tidak diinginkan dalam kondisi anaerobik. Bakteri asam laktat epifit (LAB) yang secara alami ada pada tanaman hijau merubah gula menjadi asam laktat dalam proses silase. Hal ini sudah ditetapkan bahwa LAB memainkan peran penting dalam fermentasi silase. LAB merupakan komponen utama dari flora mikroba yang hidup dalam berbagai jenis tanaman pakan ternak. LAB biasa tumbuh dengan mikroorganisme lainnya yang terkait dengan tanaman selama proses fermentasi silase, dan mereka umumnya menentukan karakteristik fermentasi silase. Silase pertanian yang lembab didasarkan pada fermentasi asam laktat alami. LAB epifit mengubah karbohidrat yang larut dalam air menjadi asam organik selama proses silase. Akibatnya, pH berkurang dan hijau diawetkan.

Namun, ketika silo dibuka dan kondisi aerobik berlaku pada waktu makan, silase dipengaruhi oleh pertumbuhan mikroba aerobik dan karena itu berpotensi tidak stabil. Selanjutnya, silase yang memburuk meningkatkan hilangnya bahan kering dan mengurangi nilai gizi. Umumnya, silase yang terawat baik dianggap lebih tahan terhadap kerusakan aerobik dibandingkan silase dengan fermentasi yang buruk dan beberapa mikroorganisme aerobik dapat berbahaya bagi kesehatan ternak. Oleh karena itu, ramalan kerusakan aerobik merupakan tugas penting dalam pembuatan silase.

5.6.4 Bal gulungan silase

Bal gulungan adalah bentuk lain dari pakan yang disimpan. Rumput dipotong dan digulung ketika masih cukup basah. Jika terlalu basah, tidak dapat digulung dan disimpan sama seperti jerami. Dengan demikian, kandungan kelembaban yang tepat untuk membuat bal gulungan silase adalah sekitar 60 sampai 70%. Bal-bal tersebut dibungkus erat dengan 6 lapisan 0,025 mm plastik film tebal di pembungkus bal. Material tersebut kemudian melalui fermentasi terbatas di mana asam lemak rantai pendek diproduksi untuk melindungi dan mengawetkan hijauan tersebut. Metode ini menjadi populer pada beberapa peternakan. Di Jepang, metode persiapan bal gulungan silase jerami padi segar dikembangkan (Gambar 5.6.3), dan produksi pakan ternak dari sumber daya biomassa diharapkan untuk mendapatkan penggunaan terbaik dari teknologi bal gulungan.



Gambar. 5.6.3 Pembuatan bal gulungan silase (kiri) dan pembungkusan (kanan) dari jerami padi.

5.6.5 Kekinian teknologi

Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah silase yang diawetkan sebagai bal gulungan telah meningkat secara dramatis, dan sistem pembuatan silase kini banyak dipraktikkan di Jepang dan negara-negara lain. Saat ini, inokulan silase baru, LAB dan jenis baru penggulung

bal rajangan dikembangkan untuk pembuatan silase jagung dan padi. Penelitian sumber daya biomassa yang tidak digunakan untuk pembuatan silase dari tanaman dan produk samping makanan sangat maju di Jepang.

Informasi Lebih Lanjut

Abe, A., The best use manual of food circulation resource, Science Forum. (2006)

Cai, Y., Silage, Dairy Japan (2004)

McDonald, P.;Henderson, N.;Heron, S.,The Biochemistry of Silage, 2nd ed., Chalcombe Publications (1991)

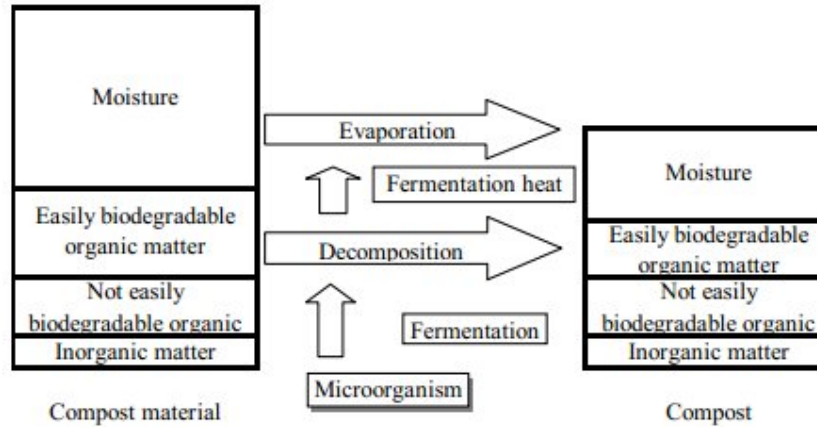
5.7 Pengomposan

5.7.1 Apa itu pengomposan?

Kompos adalah campuran dari bahan organik biodegradable seperti jerami, sekam, kulit kayu, produk limbah hewani dan bahan organik hewan/tanaman (tidak termasuk lumpur dan organ ikan) yang terakumulasi atau dicampur, dan terurai oleh panas. Namun lumpur dan organ ikan dapat dianggap sebagai kompos jika diproses dengan benar.

5.7.2 Prinsip-prinsip dasar pengomposan

Pengomposan adalah proses mengumpulkan, mencampurkan dan mengaerasi bahan organik untuk mengurainya dengan bakteri aerobik dalam bahan, menguapkan kelembaban yang dihasilkan dengan panas dari dekomposisi, dan mensterilkan atau membuat mikroba berbahaya atau biji gulma tidak aktif, untuk membuat campuran kompos yang aman dan higienis. Gambar 5.7.1 menunjukkan proses pengomposan. Pengomposan menawarkan keuntungan yaitu: (1) mudah dalam penanganan oleh pengguna yang berpikiran higienis karena menghilangkan bau berbahaya dan rasa penanganan produk limbah biologis, (2) menghasilkan hara dalam jumlah unsur yang tepat untuk pupuk yang aman dan berkualitas tinggi untuk tanah dan tanaman, dan (3) memberikan kontribusi untuk menciptakan sebuah masyarakat yang mendaur ulang sumber dayanya.



Gambar 5.7.1. Gambaran konsep dari proses pengomposan.

5.7.3 Unsur dasar pengomposan

Pengomposan pada dasarnya terdiri atas (a) praproses, (a) proses fermentasi, dan (c) proses pembentukan produk.

(a) Praproses

Praproses membutuhkan peralatan untuk menyesuaikan faktor-faktor seperti kelembaban dan bahan organik, ukuran partikel, dan aerasi untuk membuat kompos dengan sifat yang diinginkan. Ketika memulai pengomposan, kelembaban biasanya harus disesuaikan antara 55 sampai 70% dan aerasi yang baik harus disediakan. Praproses ini termasuk metode aditif (penambahan bahan penyesuaian seperti cangkang, sekam, serbuk gergaji, dan potongan kayu), metode kembali (mengembalikan produk kompos dan mencampurnya dengan bahan baku kompos), dan metode pengeringan (pengeringan menggunakan energi eksternal).

(b) Fermentasi

Fermentasi membutuhkan tangki fermentasi, peralatan aerasi dan peralatan hidrolisis. Tangki fermentasi mengurai bahan organik dan memancarkan panas untuk menaikkan suhu bahan yang terakumulasi dalam tangki fermentasi sehingga kondisi untuk menghasilkan kompos yang aman dan higienis dicapai dengan menaikkan suhu keseluruhan bahan kompos sampai 65°C atau lebih tinggi dan mempertahankan suhu tersebut selama 48 jam atau lebih. Metode fermentasi secara umum dikelompokkan ke dalam metode akumulasi dan metode pengembalian mekanis. Dalam metode

akumulasi, bahan seperti kompos, bahan penyesuai, dan kompos yang dikembalikan menumpuk di lantai dan kemudian berulang kali dibalik saat diperlukan dengan sekop, dll. Dalam metode pengembalian mekanis, sebuah perangkat agitasi yang memiliki slot untuk pengisian bahan dan slot drainase untuk pencampuran bahan dipasang di dinding sisi atas dari tangki fermentasi. Peralatan aerasi mempertahankan material pada keadaan aerobik yang seragam dan menyediakan ventilasi untuk membuat uap air menguap dari bahan secara simultan dan menyebabkan fermentasi. Peralatan hidrolisis memasok air untuk bahan untuk memastikan fermentasi aerobik terus berlangsung karena aktivitas mikroba dalam bahan berhenti ketika kelembaban dalam bahan turun di bawah 40%.

(c) Proses pembentukan produk

Proses pembentukan produk meliputi sortasi mekanis dan peralatan pengantongan/pengemasan untuk meningkatkan nilai produk dan membuat produk kompos lebih mudah untuk ditangani. Fasilitas lainnya mungkin termasuk peralatan penghilang bau sebagai bagian dari pengukuran lingkungan.

5.7.4 Teknologi pengomposan saat ini

Tabel 5.7.1 menunjukkan bahan utama yang dapat digunakan dalam pembuatan kompos. Sekam dan bahan berkayu memiliki indeks bahan biodegradable rendah sehingga dekomposisinya membutuhkan waktu lama tetapi efektif untuk meningkatkan kualitas tanah dan dapat digunakan dalam kombinasi dengan bahan lain untuk menghasilkan kompos berkualitas tinggi. Sampah mentah mengandung banyak bahan yang tidak bisa difermentasi seperti plastik, logam, dan kaca, dan juga memerlukan pemilahan menyeluruh dan praproses yang tepat. Lumpur mungkin memerlukan langkah-langkah khusus untuk penanganan logam berat, dll

Di antara teknologi daur ulang kompos, biogas, pengeringan, karbonisasi, pakan ternak, dan pembakaran, pengomposan dapat menggunakan berbagai jenis bahan dan menawarkan keuntungan yang signifikan dalam hal teknologi dan distribusi. Namun, jumlah dan periode permintaan produknya terbatas, dan beberapa daerah memiliki persediaan kompos berlebih. Upaya produksi masa depan akan membutuhkan kontrol kualitas yang terperinci, pembuatan kompos dari semua bahan yang diproduksi di daerah, dan konsumsi regional dari seluruh jumlah yang diproduksi di daerah tersebut.

Informasi Lebih Lanjut

Japan Livestock Industry Association Ed., *Composting Facility Design Manual*(2003) (dalam bahasa Jepang)

Japan Organics Recycling Association Ed., *Composting Manual*(2004) (dalam bahasa Jepang)

Livestock Industry's Environmental Improvement Organization Ed., *Livestock Dung Process Facility – Machine Setup Guidebook (compost processing facility version)* (2005) (dalam bahasa Jepang)

Tabel 5.7.1. Perbandingan bahan yang tersedia untuk pengomposan dan teknologi daur ulang lainnya (Asosiasi Daur Ulang Organik Jepang 2004)

Material Name	Type	Composting	Biogas	Drying	Carbonization	Livestock feed	Incineration
Livestock	Cattle dung	⊙	○				
	Cattle dung/urine	○	⊙				
	Dairy cow dung	⊙	○				
	Dairy cow dung/urine	△	⊙				
	Pig dung	⊙	○				
	Pig dung/urine	△	⊙				
	Chicken dung	⊙		⊙	⊙		⊙
Garbage	Raw garbage	⊙	⊙		△	△	○
Sludge	Dehydrated sludge	⊙	⊙	⊙	○		○
Crop residue	Rice husks	⊙			⊙	△	⊙
	Paddy straw	⊙				○	
Wood	Sawdust	○			△		⊙
	Bark	⊙					⊙
	Pruning waste	○			⊙		⊙
	Chips	⊙			⊙		⊙

Note: ⊙: Matches category ○: Usable △: Usable after preprocessing