



Persamaan Gompertz Termodifikasi Untuk Menentukan Pertumbuhan Bakteri Metanogen Pada Produksi Biogas

R D Werena ^{a,*}, D Wahyuningtyas ^b | L Halim ^c, M Syabriana ^d

^aTeknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Sumantri Brojonegoro No 1, Gedong Meneng, Bandar Lampung

^bTeknik Kimia, Institut Sains and Teknologi Akprind Jln. Kalisahak No. 28, Kompleks Balapan, Yogyakarta

^cTeknik Industri, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta Jl. Babarsari No.43, Janti, Caturtunggal, Sleman, Yogyakarta

^dTeknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Aceh Jl. Tgk Imum Lueng Bata, Batoh Kec Lueng Bata Kota Banda Aceh

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima : 13 Februari 2024

Direvisi : 21 April 2024

Diterbitkan : 2 Juni 2024

Kata kunci:

Pertumbuhan Mikroorganisme,
Bakteri Metanogen, Persamaan
Gompertz termodifikasi.

ABSTRAK

Pertumbuhan mikroorganisme didefinisikan sebagai fase kecepatan pertumbuhan tertentu, yang dimulai pada titik nol dan meningkat sampai nilai maksimum (μ_m) dalam jangka waktu tertentu. Pada fase akhir, kecepatan pertumbuhan menurun dan akhirnya berhenti, sehingga nilai asimptote (A) dapat dihitung. Untuk memprediksi pertumbuhan mikroorganisme dalam biodigester, diperlukan model matematis yang sesuai dengan pola pertumbuhan bakteri, dalam hal ini metode persamaan Gompertz. Metode yang digunakan untuk menganalisis pertumbuhan mikroorganisme adalah persamaan Gompertz termodifikasi. Konstanta matematis μ_m , λ , A ditentukan dengan menggunakan metode Newton Raphson menggunakan software matlab 7.6.0. Nilai A, μ_m , λ yang dipilih adalah yang memberikan Sum of Square Errors (SSE) Nilai Konstanta μ , digester A (limbah jeruk langsung) memiliki laju produksi metana sebesar 0,7283 mL/gVS.hari, dan digester B (sludge biohidrogen) 1,0859 mL/gVS.hari Nilai λ pada digester A (limbah jeruk langsung) 0,0169 hari, B (sludge biohidrogen) 0,0479 hari Konstanta A yang mewakili produksi metana potensial tertinggi diperoleh oleh digester B sebanyak 8,626 mL/gVS dan digester A sebanyak 4,795 mL/gVS. Model kinetika pertumbuhan bakteri metanogen menggunakan persamaan Gompertz termodifikasi memberikan hasil y hitung dan y percobaan terhadap kedua biodigester cukup berbeda dengan nilai A 4,7951 mL/gVS, μ 0,7283, dan λ 0,0169 hari untuk digester A dan A 8,6260 mL/gVS, μ 1,0859, dan λ 0,0479 hari untuk digester B.

1. Pendahuluan

Biometana atau biogas merupakan sumber energi yang sangat potensial sebagai energi terbarukan karena nilai kalornya yang cukup tinggi yaitu 50 MJ/kg. Salah satu contoh sumber timbunan limbah organik yang potensial dieksploitasi sebagai sumber energi biometana adalah Pasar Induk Buah dan Sayur Gemah Ripah, Gamping, Sleman Yogyakarta. Sekitar 3-4 ton limbah buah dapat dihasilkan tiap harinya pada musim panen, sedangkan pada musim biasa sebanyak 2-3 ton/hari. Hampir 50% dari limbah yang ditimbulkan setiap harinya berasal dari buah jeruk.

Dalam produksi biogas sangat bergantung dengan pertumbuhan bakteri metanogen yang ada di dalam digester, untuk mengetahui bahwa pertumbuhan bakteri metanogen di dalam biodigester baik sehingga gas metana (CH₄) dalam biogas meningkat digunakan persamaan Gompertz.

Pertumbuhan mikroorganisme didefinisikan sebagai fase kecepatan pertumbuhan tertentu, yang dimulai pada titik nol dan meningkat sampai nilai maksimum (μ_m) dalam jangka waktu tertentu. Pada fase akhir, kecepatan pertumbuhan menurun dan akhirnya berhenti, sehingga nilai asimptote (A) dapat dihitung. Untuk memprediksi pertumbuhan mikroorganisme dalam biodigester, diperlukan model matematis yang sesuai dengan pola pertumbuhan bakteri, dalam hal ini metode persamaan Gompertz digunakan untuk memprediksi pertumbuhan mikroorganisme didalam biodigester. Jika kurva pertumbuhan diplotkan sebagai log pertambahan jumlah sel terhadap waktu, maka kurva sigmoidal akan dihasilkan dengan fase lag setelah $t = 0$, diikuti oleh fase eksponensial dan fase stationery.

Persamaan Gompertz termodifikasi adalah model persamaan matematis yang cocok digunakan untuk memprediksi pertumbuhan mikroorganisme. Kurva Gompertz sendiri

*Penulis korespondensi.

E-mail: rosalia.werena@eng.unila.ac.id

merupakan fungsi sigmoid mengikuti pola hiperbolik yang memiliki batas (asimtot) pada kedua belah sisinya (atas dan bawah) (Zwiettering et al., 1990). Persamaan Gompertz ini merupakan model matematis untuk pengamatan time series, yaitu pertumbuhan paling lambat pada saat awal dan akhir periode waktu

2. Metodologi

Metode yang digunakan untuk menganalisis pertumbuhan mikroorganisme adalah persamaan Gompertz termodifikasi seperti terlihat dalam persamaan dibawah ini :

$$y = A \exp \left\{ - \exp \left[\frac{\mu_m e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Dengan :

y = produksi biogas kumulatif, mL

A = produksi biogas potensial, mL

μ_m = laju produksi biogas maksimum (mL/hari)

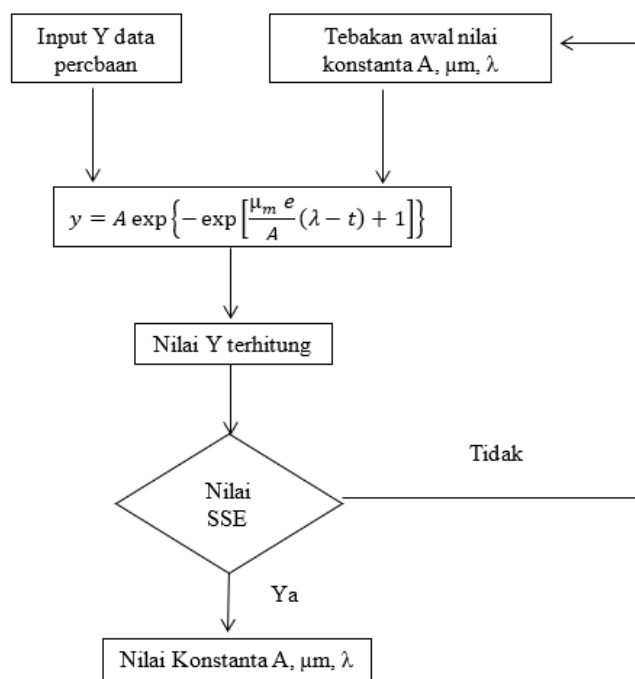
λ = lama lag phase, waktu minimum untuk memproduksi biogas, hari

t = waktu kumulatif untuk produksi biogas, hari

e = konstanta euler 2,718282

Konstanta matematis μ_m , λ , A ditentukan dengan menggunakan metode Newton Rhaspon menggunakan software matlab 7.6.0. Nilai A , μ_m , λ yang dipilih adalah yang memberikan Sum of Square Errors (SSE) terkecil dimana SSE didefinisikan sebagai :

$$SSE = \sum (Y \text{ data} - Y \text{ hitung})^2 \quad (2)$$



Gambar 1. Flow chart Alogaritma Perhitungan mencari nilai Konstanta A , μ_m , λ

3. Hasil dan pembahasan

Pada penelitian ini biogas terbentuk dari limbah jeruk langsung (Digester A) dan sludge sisa biohidrogen dari buah jeruk (Digester B).

Proses produksi biogas pada kedua digester sangat berbeda. Pada Digester A, peningkatan kadar metana lambat karena dominasi bakteri penghasil asam yang menghambat bakteri metanogen. Proses hidrolisis yang terhambat membatasi pembentukan metana. Digester B, yang menggunakan sludge biohidrogen, sudah mengalami hidrolisis dan pembentukan asam, sehingga lebih efisien dalam produksi metana.

Nilai Kalor dan metana yang dihasilkan pada dua digester tersebut adalah :

Tabel 1

Nilai Kalor dan Metana hasil Percobaan

Konstanta	Digester A	Digester B
Nilai Kalor (kJ/m3)	4968,14	8302,28
Metana	16,74%	27,83%

Pada digester A (limbah jeruk langsung) peningkatan kadar metana sangat lambat dibandingkan dengan digester B (limbah sludge biohidrogen), hal ini disebabkan oleh dominasi bakteri penghasil asam yang tidak diikuti oleh pertumbuhan bakteri metanogen. Bakteri penghasil metana pada digester A membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menyesuaikan diri dengan lingkungannya yang asam. Gerrardi (2003) menjelaskan bahwa substrat untuk menjadi biometana akan melalui 3 tahapan, yaitu hidrolisis, pembentukan asam, dan metanogenesis. Subtrat pada digester A, yaitu limbah buah jeruk harus di proses secara hidrolisis, kemudian proses pembentukan asam baru kemudian proses metanogenesis. Gerrardi (2003) juga menjelaskan jika tahapan hidrolisis dalam proses degradasi anaerob mengalami inhibisi maka substrat yang akan dilanjutkan untuk proses pembentukan asam akan berkurang sehingga metana yang terbentuk akan sangat terbatas. Pada digester B hal ini tidak terjadi dikarenakan substrat yang digunakan merupakan substrat kompleks yang sudah melalui proses hidrolisis dan pembentukan asam. Sludge sisa dari proses biohidrogen ini memiliki nilai asam organik (VFA) yang cukup banyak untuk dijadikan substrat oleh bakteri metanogen untuk menghasilkan gas metana.

Biogas pada digester B diperoleh dengan mengkonversi nilai Volatile Fatty Acid (VFA) untuk menjadi biogas. VFA merupakan substrat bagi bakteri metanogen yang dihasilkan pada tahapan pembentukan asam. Konsentrasi VFA merupakan indikator yang sangat baik untuk memonitor proses degradasi secara anaerobik. Akan tetapi, konsentrasi VFA yang tinggi menyebabkan nilai pH turun atau menjadi asam dan menghasilkan kondisi yang toksik didalam digester (Franke-Whittle, 2014). Oleh karena itu dalam proses pembentukan biogas ini dilakukan pH kontrol. pH kontrol dilakukan dengan cara menambahkan larutan NaOH 2 M pada tiap pembacaan gas

Dalam produksi biogas untuk menentukan bahwa kinetika pertumbuhan bakterinya berjalan digunakan persamaan Gompertz.

3.1 Fungsi Matlab

Menggunakan software matlab 7.6.0 dengan fungsi sebagai berikut :

```
function Rosalia
clear
clc
```

```

global t e y1 y1_hit y2 y2_hit y3 y3_hit y4 y4_hit ...
y1P y1P_hit y3P y3P_hit
t=[0 6 12 18 24 30]; %hari
e=exp(1);
tt=0:0.5:30;

% Data A (Digester dengan Limbah Jeruk Langsung)
y1=[0 3.505 4.431 4.973 5.145 5.147]; %mL/gVS
nilai_tebak1=[3.1e2 6.0e-1 1.1e-2];
[constant1,SSE1]=fminsearch(@minimumSSE1,nilai_tebak
1);
SSEmin1=SSE1(1);
A1=constant1(1);mu1=constant1(2);lamda1=constant1(3);
y1_sim=spline(t,y1_hit,tt);
persen_ralat1=(abs(y1_hit-y1)./y1).*100;

% Data B (Digester dari Sludge Biohidrogen)
y2=[0 6.783 7.809 8.526 8.731 8.809]; %mL/gVS
nilai_tebak2=[4.1e2 3.1e-1 3.1e-2];
[constant2,SSE2]=fminsearch(@minimumSSE2,nilai_tebak
2);
SSEmin2=SSE2(1);
A2=constant2(1);mu2=constant2(2);lamda2=constant2(3);
y2_sim=spline(t,y2_hit,tt);
persen_ralat2=(abs(y2_hit-y2)./y2).*100;

% Grafik
figure(1)
plot(t,y1,'ko',tt,y1_sim,'k-')
xlabel('waktu kumulatif, hari')
ylabel('volume spesifik metana, mL/gVS')
legend('percobaan','hitung')
title('Digester dengan Limbah Jeruk Langsung')
figure(2)
plot(t,y2,'ko',tt,y2_sim,'k-')
xlabel('waktu kumulatif, hari')
ylabel('volume spesifik metana, mL/gVS')
legend('percobaan','hitung')
title('Digester dengan Sludge Biohidrogen')
figure(3)
plot(t,y1,'ko',tt,y1_sim,'k-',t,y2,'kd',tt,y2_sim,'k:')
xlabel('waktu kumulatif, hari')
ylabel('volume spesifik metana, mL/gVS')
legend('jeruk langsung (percobaan)','jeruk langsung
(hitung)','sludge biohidrogen (percobaan)','sludge biohidrogen
(hitung)')
title('Hubungan volume spesifik metana dan waktu untuk
variasi substrat limbah jeruk')

% Tampilan
disp(' ')
disp('Konstanta untuk perbandingan')
disp('Digester dengan Limbah Jeruk Lagsung')
disp('=====')
fprintf('A = %6.4f\n',[A1])
fprintf('mu = %6.4f\n',[mu1])
fprintf('lamda = %6.4f\n',[lamda1])
disp('dimana:')
fprintf('SSE minimum = %6.4e\n',[SSEmin1])
disp('=====')
disp('Perbandingan data eksperimen dan hitung volume
spesifik metana')
disp('=====')
=====

```

```

disp(' t | y eksp | y hitung | Ralat |')
disp('-----')
disp(' hari | mL/gVS | mL/gVS | % |')
disp('-----')
fprintf("\t%4.0f \t\t%10.4f \t\t%10.4f \t\t%6.2f\n",t,y1,y1_hit,persen_ralat1))
disp('=====')

disp(' ')
disp('Konstanta untuk perbandingan')
disp('Digester dengan Sludge Biohidrogen')
disp('=====')
fprintf('A = %6.4f\n',[A2])
fprintf('mu = %6.4f\n',[mu2])
fprintf('lamda = %6.4f\n',[lamda2])
disp('dimana:')
fprintf('SSE minimum = %6.4e\n',[SSEmin2])
disp('=====')
disp('Perbandingan data eksperimen dan hitung volume
spesifik metana')
disp('=====')
=====

disp(' t | y eksp | y hitung | Ralat |')
disp('-----')
disp(' hari | mL/gVS | mL/gVS | % |')
disp('-----')
fprintf("\t%4.0f \t\t%10.4f \t\t%10.4f \t\t%6.2f\n",t,y2,y2_hit,persen_ralat2))
disp('=====')

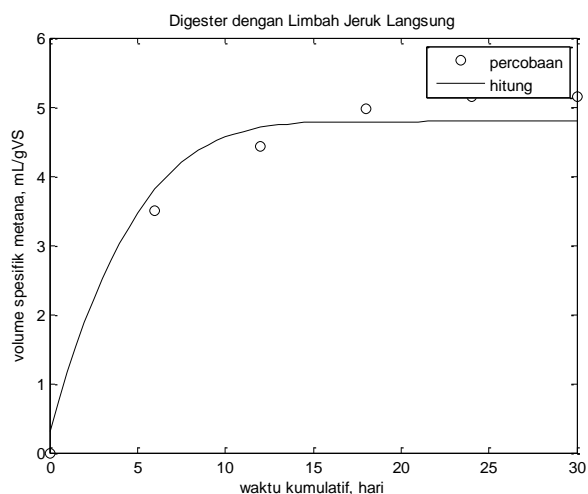
disp(' ')

% Fungsi 1
function fSSE1=minimumSSE1(k)
global t e y1 y1_hit
y1_hit=k(1)*exp(-exp(k(2)*e/k(1)*(k(3)-t)+1));
fSSE1=sum(y1_hit-y1)^2;
% Fungsi 2
function fSSE2=minimumSSE2(k)
global t e y2 y2_hit
y2_hit=k(1)*exp(-exp(k(2)*e/k(1)*(k(3)-t)+1));
fSSE2=sum(y2_hit-y2)^2;

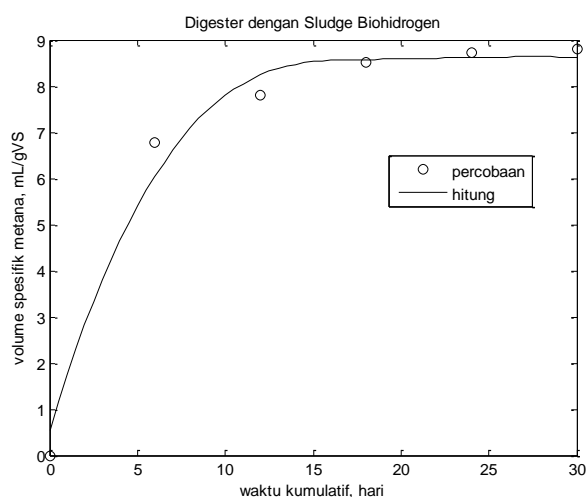
```

3.2 Kinetika Pertumbuhan Bakteri Metanogen

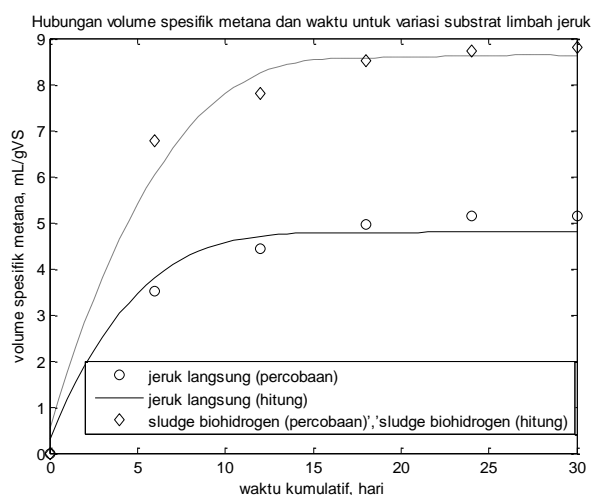
Kinetika pertumbuhan bakteri metanogen didalam digester batch dapat didekati dengan persamaan Gompertz termodifikasi, hal ini berdasarkan asumsi bahwa laju produksi biogas didalam digester akan sebanding dengan pertumbuhan spesifik dari bakteri metanogen yang lambat pada saat awal dan akhir periode. Konstanta kinetika A, λ dan μ ditetapkan dengan cara menebak ketiga konstanta tersebut untuk mencari y hitung, yang kemudian plotkan ke program Matlab dengan minimasi f min search yang menghasilkan SSE minimal.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. Flow chart Alogaritma Perhitungan mencari nilai Konstanta A, μ , λ

Gambar 2a menjelaskan tentang produksi metana yang bersumber dari Digester A dan Gambar 2b dari digester B dan gambar 2c gabungan dari kedua digester untuk dijadikan

perbandingan. Dari gambar 2c, terlihat bahwa nilai konstanta A yang mewakili produksi metana potensial tertinggi diperoleh oleh digester B dengan menggunakan substart dari sludge biohidrogen. Pada digester A yang menggunakan substart limbah buah jeruk langsung mengalami penurunan produksi metana potensial, karena adanya akumulasi VFA oleh bakteri penghasil asam pada proses pembentukan asam yang menyebabkan pertumbuhan bakteri metanogen terhambat.

Tabel 2

Konstanta Kinetika Produktivitas Biogas

Konstanta	Digester A	Digester B
A (mL/gVS)	4,7951	8,6260
μ (mL/hari)	0,7283	1,0859
λ (hari)	0,0169	0,0479

Konstanta μ mewakili laju produksi metana (mL/gVS.hari), digester A (limbah jeruk langsung) memiliki laju produksi metana sebesar 0,7283 mL/gVS.hari, dan digester B (sludge biohidrogen) 1,0859 mL/gVS.hari. Nilai μ yang lebih rendah pada digester A dapat berarti bahwa laju produksi biogas dengan menggunakan limbah buah jeruk secara langsung lebih lama dari pada menggunakan sludge sisa dari proses biohidrogen. Hal ini dikarenakan penggunaan limbah buah jeruk langsung terdapat lignoselulosa yang jumlahnya lebih banyak dari pada sludge sisa produksi biohidrogen yang menjadi faktor penyebab degradasi anaerobik berjalan tidak sempurna. Sludge sisa dari proses biohidrogen yang merupakan parsial digested biomassa ini memiliki karakteristik lignoselulosa yang lebih kecil sehingga proses pembentukan biogas dapat lebih cepat dari digester A yang menggunakan limbah buah jeruk langsung.

Waktu minimum untuk memproduksi biogas dinyatakan dalam λ (hari). Nilai λ pada digester A (limbah jeruk langsung) 0,0169 hari, B (sludge biohidrogen) 0,0479 hari. Karakteristik limbah pada kedua digester umumnya sama karena berasal dari limbah buah jeruk. Oleh karena itu, λ pada penelitian ini hasilnya hampir sama. Deublein dan Steinhauser (2008) menyatakan bahwa proses hidrolisis senyawa karbohidrat berlangsung dalam beberapa jam. Hal ini menyebabkan nilai λ pada penelitian ini kecil.

Konstanta A yang mewakili produksi metana potensial tertinggi diperoleh oleh digester B sebanyak 8,626 mL/gVS dan digester A sebanyak 4,795 mL/gVS. Nilai tertinggi yang diperoleh digester B dikarenakan penggunaan limbah sisa dari proses biohidrogen mengkonversi asam-asam organik untuk menjadi metana. Sehingga, walaupun terjadi akumulasi nilai VFA baik diantara kedua digester, digester A jauh lebih asam kondisinya karena akumulasi VFA lebih besar. Akumulasi VFA ini sendiri terjadi karena dominasi bakteri penghasil asam sehingga proses pembentukan asam berlangsung cepat dan menyebabkan pertumbuhan bakteri metanogen terlambat.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh adalah dengan menggunakan Pemodelan kinetika pertumbuhan bakteri metanogen menggunakan persamaan Gompertz termodifikasi memberikan hasil :

Dengan menggunakan sampah dari buah jeruk metana yang dihasilkan adalah sebesar 0,7283 sementara dengan limbah buah jeruk yang telah mengalami hidrolisis adalah sebesar. 1,0859.

Dengan menggunakan sampah dari buah jeruk maka potensi metana yang dihasilkan adalah sebesar 4,7951 mL/gVS sementara

dengan limbah buah jeruk yang telah mengalami hidrolisis adalah sebesar 8,6260 mL/gVS. Hal ini membuktikan bahwa pertumbuhan bakteri metanogen berlangsung cepat pada digester B.

Daftar pustaka

- Amani, T., Nosrati, M., Mousavi, S. M., & Kermanshahi, R. K. (2015). Study of syntrophic anaerobic digestion of volatile fatty acids using enriched cultures at mesophilic conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1601-1608. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0538-6>
- Boonthanom, R., & Juntawang, N. (2021). Effect of temperature on anaerobic digestion performance and microbial community structure of food waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100700. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100700>
- Cai, M., Liu, J., Wei, Y., Cheng, J., & Cui, R. (2016). Influence of additives on biogas production in anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 216, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.053>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Fotidis, I. A., Karakashev, D., Kotsopoulos, T. A., Martzopoulos, G. G., & Angelidaki, I. (2014). Effect of ammonium and acetate on methanogenic pathway and methanogenic community composition. *FEMS Microbiology Ecology*, 88(1), 38-48. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12266>
- Li, K., Liu, R., & Sun, C. (2020). Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four different livestock manures with rice straw. *Bioresource Technology*, 306, 123120. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123120>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- Liu, Y., Balkwill, D. L., Aldrich, H. C., Drake, G. R., & Boone, D. R. (1999). Characterization of the anaerobic propionate-degrading syntrophs *Syntrophobacter wolinii* and *Syntrophobacter pfefferii*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 49(2), 545-556. <https://doi.org/10.1099/00207713-49-2-545>
- Luo, C., Lü, F., Shao, L., & He, P. (2020). Application of biochar and its hybrids in biogas production from anaerobic digestion of organic solid waste: A review. *Bioresource Technology*, 302, 122923. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122923>
- Mizuki, E., Akao, T., & Saruwatari, T. (1990). Inhibitory effect of Citrus unshu peel on anaerobic digestion. *Journal of Biological Waste*, 33(3), 161-168.
- Sun, C., Liu, R., & Liu, J. (2020). Insight into the effects of biochar on anaerobic digestion: From methanogenic population and enzymatic activity to microbial community. *Bioresource Technology*, 300, 122674. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122674>
- Yang, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2021). Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110367>
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875-1881.