

PENGEMBANGAN MODEL SIMULASI PROSES PENGOMPOSAN SAMPAH ORGANIK PERKOTAAN DALAM BIOREAKTOR¹⁾

(A Simulation Model of Composting of Organic Municipal Solid Waste in A Bioreactor)

Yohanes Setiyo, Hadi K. Purwadaria²⁾, Arief Sabdo Yuwono²⁾, dan
M. Ahkam Subroto^{2,3)}

ABSTRACT

Municipal solid waste or MSW has potency to be decomposed by microorganisms and transformed into compost. The waste contains 60%-75% of organic materials C, H, O, and N. The aim of this research was to develop a simulation model based on mathematical equations describing the phenomenon of the composting. The population of microorganisms, the rate of O_2 consumption, the rate of CO_2 production, the rate of H_2O production, the rate of carbon nitrogen ratio or C/N, and temperature were the variables tested in this research. Validation was carried out by comparing datum of simulation model with datum of composting. Simulation model was declared valid if the values of each parameter were $r^2 > 0.75$, the total value of E_r was closed to zero, and the distribution of E_r was independent to time. The sensitivity test was analyzed by comparing the value changes of variable tied with the value changes of free variable. Correction from the simulation model in predicting the microorganism population, CO_2 , O_2 , and temperature could be expressed respectively as $y' = 1.06(y-1.003)$, $y' = 1.07(y+0.07)$, $y' = 1.02(y+0.05)$, and $y' = 1.02(y-1.05)$. The temperature, the C/N and the rate of O_2 consumption were sensitive to the changes of microorganism population and the radius of the bioreactor.

Key words: composting, organic materials, simulation, bioreactor

PENDAHULUAN

Pengomposan merupakan reaksi kimia dan biologis yang kompleks. Bahan organik padat didegradasi menjadi bahan yang stabil sebagai pupuk organik (Nakasaki *et al.*, 1987). Kecepatan pengomposan bergantung pada sifat fisik bahan, mikroorganisme yang berperan, dan kondisi lingkungan untuk proses. Emerton *et al.* (1988) mengkaji perubahan suhu dan kadar air pada pengomposan bahan organik padat dengan aliran udara secara paksa dan aliran udara secara alami. Inbar *et al.* (1988) meneliti hubungan kadar air dan laju konsumsi oksigen pada pengomposan limbah pertanian. Hobson (1987) mengkaji peranan mikroorganisme dalam mendegradasi ukuran partikel substrat yang dikomposkan.

Kondisi proses pengomposan dapat dioptimalkan untuk menghasilkan kompos yang berkualitas. Model simulasi pengomposan disusun berdasarkan

¹⁾ Bagian dari disertasi penulis pertama, Program Studi Keteknikan Pertanian, Sekolah Pascasarjana IPB

²⁾ Berturut-turut Ketua dan Anggota Komisi Pembimbing

³⁾ Peneliti LIPI Bioteknologi

pendekatan fenomena reaksi kimia dan fenomena biologis selama proses pengomposan. Keluaran utama dari model simulasi adalah dinamika proses pengomposan yang ditunjukkan oleh populasi mikroorganisme, suhu, konsentrasi CO₂ di pori-pori sampah, konsentrasi O₂ di pori-pori sampah, dan C/N kompos.

Tujuan umum dari penelitian ini adalah mengembangkan model simulasi pengomposan sampah dalam bioreaktor berbentuk setengah silinder. Tujuan khusus adalah melakukan validasi terhadap variabel-variabel populasi mikroorganisme, R_{O2}, R_{CO2}, C/N, dan suhu, serta melakukan uji kepekaan terhadap variabel-variabel populasi awal mikroorganisme, jari-jari reaktor, kerapatan massa, dan porositas sampah organik.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan untuk pengomposan adalah sampah terpilih dari TPA Desa Suwung, Kota Denpasar. Sampah diambil secara terseleksi yang berumur 1 hari dari waktu pembuangan di TPA. Sampah yang dikomposkan terdiri dari daun basah, rumput, sayur-sayuran, dan daun kering terseleksi.

Metode

Pengembangan model simulasi

Data awal untuk bioreaktor pengomposan sampah adalah panjang bioreaktor (L) dengan nilai minimum 3 m dan harga L merupakan kelipatan 0.3 m, jari-jari tungku (r_d) nilainya 0.3 m, serta jari-jari luar tungku (r_L) nilai minimum 1.2 m dan harga r_L merupakan kelipatan 0.3 m. Data awal untuk proses simulasi ditetapkan dX = dr = 0.3 m.

Matriks fraksi sampah (Kim) dengan elemen matriks jumlah unsur-unsur kimia C, H, O, dan bobot unsur-unsur C, H, O, dan N atau BAUn dalam bentuk matriks BAUn. Matriks sifat fraksi sampah (F_{SO}) dengan elemen matriks kadar air, kerapatan massa, porositas, dan C/N. Presentase dari setiap fraksi sampah organik yang dikomposkan disusun dalam bentuk matriks P_{SO}.

Stabilitas program simulasi pengomposan harga bilangan Fourier's (F_o) adalah 0.15 karena dipersyaratkan Fo < 0.25. Harga bilangan Biot atau Bi = 0.4, karena dipersyaratkan F_o × Bi < 0.5. Data pendukung lainnya adalah RQ dengan nilai 0.35 s/d 0.7, Gm dengan nilai 10 s/d 15, Y_{rs} dengan harga 10⁻¹⁰ sampai 10⁻¹¹ mole/sel/jam, dan m dengan harga 10⁻¹⁵ sampai dengan 10⁻¹⁷ mole/sel/jam. Angka-angka ini merupakan data hasil penelitian Nakasaki *et al.* (1987).

Matriks sifat fisik MSW yang dikomposkan atau S_{fa}. Kadar air atau M_C = S_{fa}(1), kerapatan massa atau Pros = S_{fa}(2), porositas atau E = S_{fa}(3), dan ratio karbon nitrogen MSW atau C/N = S_{fa}(4). Presentase unsur-unsur C, H, O, dan N dari sampah yang dikomposkan (P_{UN}) dan bobot fraksi (B_{FR}) masing-masing dirumuskan

$$P_{UN} = Kim \times BAUn \dots\dots\dots (1)$$

$$B_{FR} = P_{UN^{-1}} \times P_{SO} \dots\dots\dots (2)$$

Laju perkembangbiakan bakteri dan kapang pada fase logaritmik masing-masing adalah $\mu_b = 0.203 \times 1.76^t$ dan $\mu_k = 0.1095 \times 2.135^t$. Laju perkembangbiakan bakteri dan kapang pada fase laju menurun dirumuskan dengan $\mu_b = 0.722 - 4.9 \times 10^{-2}t$ dan $\mu_k = 0.63 - 5.35 \times 10^{-2}t$. Pada fase stasioner harga $\mu_b = \mu_k = 0$, sedangkan untuk fase kematian dirumuskan dengan $\mu_b = 10/(-14. - 126.3 \times 0.733^{t-1})$ dan $\mu_k = 10/(-14. - 126.3 \times 0.733^{t-1})$. Populasi mikroorganisme pengomposan adalah

$$X_{b,t} = X_{b,t-1} e^{\mu_b(t)} \dots\dots\dots (3)$$

$$X_{k,t} = X_{k,t-1} e^{\mu_k(t)} \dots\dots\dots (4)$$

$$X_{s,t} = X_{s,t-1} e^{\mu_s(t)} \dots\dots\dots (5)$$

dan pertambahan populasi mikroorganisme ($R_{X,t}$) adalah

$$R_{X,t} = X_t - X_{t-1} \dots\dots\dots (6)$$

Menurut Nakasaki *et al.* (1987), pada awal pengomposan mikroorganisme $R_{CO_2,t}$.

$$R_{CO_2,t} = 24(Y_{rs} \times R_{X,t} + m' \times X_{t-1}) \text{ untuk } R_{X,t} > 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{CO_2,t} = 24m' \times X_t \text{ untuk } R_{X,t} < 0 \dots\dots\dots (8)$$

dan harga f_t adalah $f_t = R_{CO_2,t}$. Nilai $R_{O_2,t}$ diselesaikan dengan persamaan

$$R_{O_2,t} = \frac{R_{CO_2,t}}{RQ} \dots\dots\dots (9)$$

dengan harga $e_t = R_{O_2,t}$. Nilai $R_{H_2O,t}$ dengan persamaan

$$R_{H_2O,t} = \frac{R_{CO_2,t}}{Gm} \dots\dots\dots (10)$$

dengan harga g_t diselesaikan dengan persamaan (10).

$$k_t = a_t - f_t k_t \dots\dots\dots (11)$$

$$m_t = b_t - 2g_t \dots\dots\dots (12)$$

$$n_t = 2e_t + c_t - 2f_t - g_t \dots\dots\dots (13)$$

$$o_t = d_t \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{C}{N} = \frac{12k}{14o_t} \dots\dots\dots (15)$$

Kondisi awal nilai-nilai $a_{(1)} = C/12$, $b_{(1)} = H/1$, $c_{(1)} = O/16$, $d_{(1)} = N/17$, dan $C/N_{(1)} = S_{fa}(4)$. Konsentrasi O_2 di dalam pori-pori MSW diselesaikan dengan persamaan

$$C_{O_2(t,j,k)} = C_{O_2(t-1,j,k)} + D_r \frac{C_{O_2(t-1,j-1,k)} - C_{O_2(t-1,j+1,k)} + C_{O_2(t-1,j,k-1)} - C_{O_2(t-1,j,k+1)}}{2dX} - 0.032R_{O_2,t} m_{s(j)}$$

dan konsentrasi CO_2 dengan persamaan

$$C_{CO_2(t,j,k)} = C_{CO_2(t-1,j,k)} + D_r \frac{C_{CO_2(t-1,j-1,k)} - C_{CO_2(t-1,j+1,k)} + C_{CO_2(t-1,j,k-1)} - C_{CO_2(t-1,j,k+1)}}{2dX} + 0.044R_{CO_2,t} m_{s(j)} \dots (16)$$

sedangkan konsentrasi uap air dengan persamaan

$$C_{H_2O(t,j,k)} = C_{H_2O(t-1,j,k)} + D_r \frac{C_{H_2O(t-1,j+1,k)} - C_{H_2O(t-1,j,k)} + C_{H_2O(t-1,j,k-1)} - C_{H_2O(t-1,j,k+1)} + 0.018R_{H_2O,t}.m_{s(j)}}{2dX} \dots (17)$$

Panas hasil reaksi kimia pengomposan atau Q_{rk} dirumuskan dengan

$$Q_{rk(t,j,k)} = \frac{106.m_{s(j)}.R_{O_2(t)}}{4.83C_{ps(t)}} \dots (18)$$

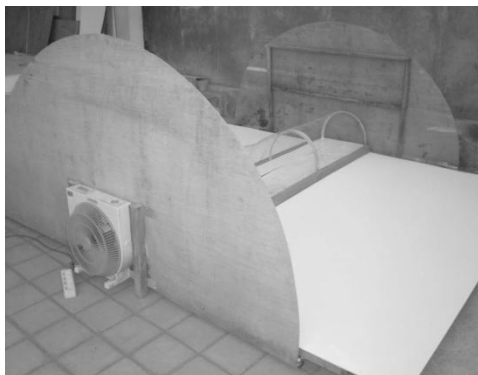
sedangkan panas untuk mengupayakan air diselesaikan dengan persamaan

$$Q_{wk(t,j,k)} = \frac{m_{s(j)}R_{H_2O(t)}h_{fg}}{4800C_{ps(t)}} \dots (19)$$

Persamaan matematika model simulasi suhu untuk $0 < x < L$ dan $r_d < r < r_L$ adalah

$$T_{(t,j,k)} = Fo(T_{(t-1,j-1,k)} + T_{(t-1,j+1,k)} + T_{(t-1,j,k+1)} + (1-4Fo)T_{(t-1,j,k)} + Q_{rk(t,j,k)} - Q_{wk(t,j,k)}) \dots (20)$$

Gambar 1 menyajikan prototipe bioreaktor yang digunakan dalam penelitian dan metode pemupukan sampah organik.



Prototipe bioreaktor



Metode penumpukan sampah organik

Gambar 1. Prototipe bioreaktor setengah silinder

Uji validasi dan kepekaan model simulasi pengomposan

Menurut Hogg dan Ledolter (1987), uji statistik untuk validasi model simulasi adalah *scatter plot*, *residual plot*, dan uji koefisien korelasi (r^2) dari data variabel terikat keluaran model simulasi dan data percobaan pengomposan. Suatu model simulasi dinyatakan valid jika E_{rr} bersifat independen terhadap posisi titik dan waktu pengamatan, r^2 lebih besar dari 0.75, dan total E_{rr} mendekati harga nol.

Pengukuran suhu dengan termometer, konsentrasi O_2 , dan konsentrasi CO_2 dengan *cosmotector* ditentukan pada titik-titik sampel yang mewakili lapisan atas, mewakili lapisan tengah, dan mewakili lapisan bawah. Pengukuran dilakukan setiap hari. Analisis kimia kompos dilakukan setiap minggu.

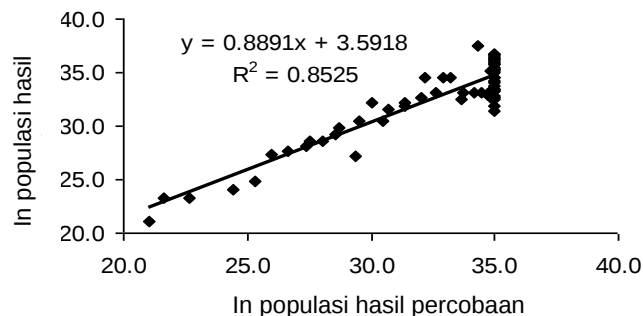
Analisis kepekaan model dilakukan dengan mengubah salah satu variabel bebas dari model yang dianalisis sebesar ($\pm 10\%$ dan $\pm 20\%$) pada keadaan variabel bebas lainnya tetap. Variabel bebas yang diubah adalah konsentrasi

mikroorganisme awal (X_0), jari-jari tumpukan (r_L), kerapatan massa (ρ_s), dan porositas (ϵ).

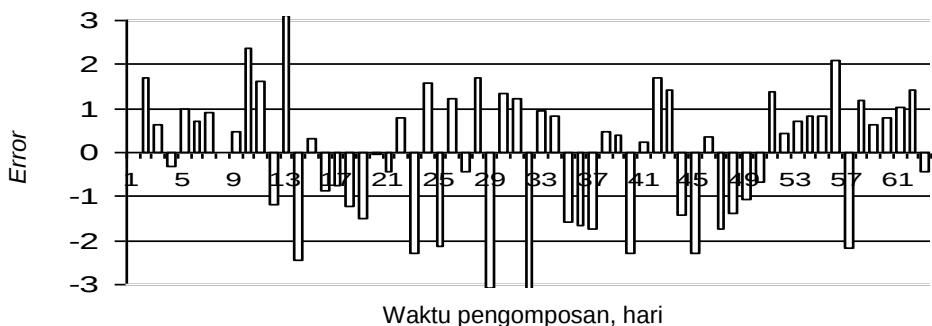
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan antara $\ln$ populasi konsorsium mikroorganisme hasil simulasi (y) dan hasil pengukuran (x) dari beberapa uji validasi mendapatkan gradient persamaan garis lurus 0.89 sampai 0.98 dengan r^2 antara 0.85 dan 0.99 dan nilai E_{rr} antara 0.081 dan 1.7. Nilai gradient persamaan garis lurus mendekati 1, nilai $r^2 > 0.75$, $E_{rr} = 1.03$ dengan total kesalahan (E_{rr}) mendekati harga nol, dan distribusi kesalahan independen terhadap waktu, secara statistik menurut Hogg dan Ledolter (1987) model simulasi populasi mikroorganisme dinyatakan valid. Gambar 2 merupakan hubungan data populasi mikroorganisme hasil model simulasi dengan hasil percobaan untuk kerapatan massa sampah organik di awal pengomposan 180 kg/m^3 dengan jari-jari reaktor 1.8 m.

Selisih rata-rata $\ln$ populasi konsorsium mikroorganisme hasil pengukuran dengan $\ln$ populasi konsorsium mikroorganisme hasil simulasi model dari tiga titik pengukuran $r = 1.2 \text{ m}$, $r = 0.9 \text{ m}$ dan $r = 0.6 \text{ m}$ ditampilkan pada Gambar 3. Nilai kesalahan terdistribusi dari -3.4 sampai dengan 3.1, dengan kesalahan terkecil 0.113 dan kesalahan terbesar -3.4.

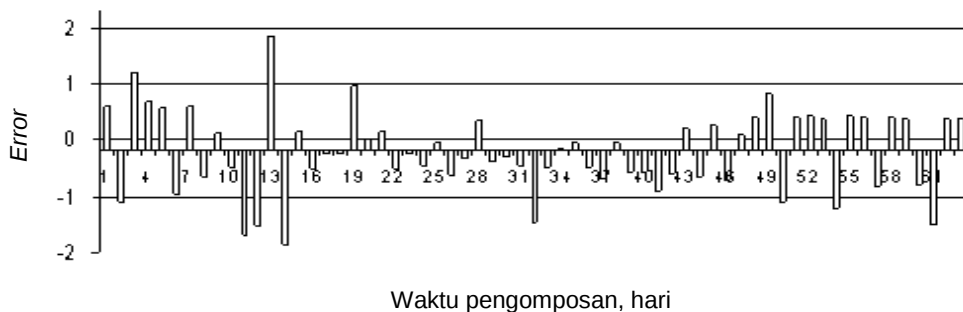


Gambar 2. Hubungan $\ln$ populasi mikroorganisme hasil model simulasi dan hasil percobaan



Gambar 3. *Error* $\ln$ populasi konsorsium mikroorganisme hasil model simulasi dan pengukuran

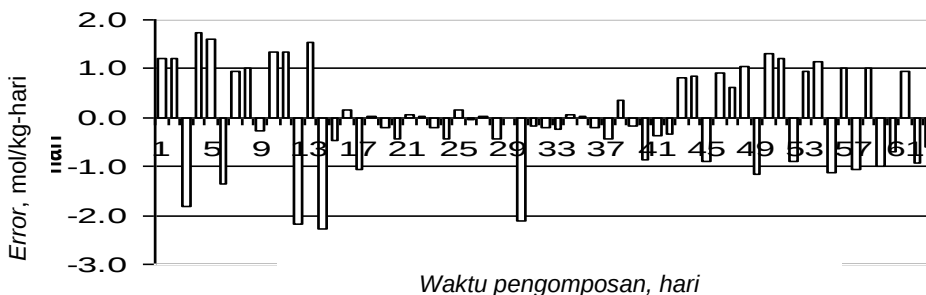
Produksi gas karbon dioksida (R_{CO_2}) pada reaksi pengomposan sampah mencapai puncak pada fase pertumbuhan logaritmik. Produksi gas CO_2 tertinggi sekitar 16-18 mol per kg sampah kering per hari, hal ini disebabkan oleh reaksi penguraian sampah mencapai puncak. Rata-rata R_{CO_2} hasil model simulasi adalah 1.2 mol per kg sampah kering per hari.



Gambar 4. Kesalahan R_{CO_2} hasil model simulasi dan pengukuran

R_{CO_2} hasil model simulasi dengan hasil pengukuran selisihnya digambarkan pada Gambar 4. Kesalahan antara keduanya berkisar antara -1.6 dan 2.0 mol/kg sampah kering, kesalahan terkecil 0.029 mol per kg sampah kering. Distribusi kesalahan independen terhadap waktu pengamatan.

Harga R_{O_2} mencapai puncaknya pada pertumbuhan mikroorganisme pada fase logaritmik. Fase ini terjadi sekitar hari ke 7-10 pada reaksi pengomposan sampah. Konsumsi oksigen saat mencapai puncak adalah 50 mol per kg sampah kering per hari, hal ini disebabkan oleh kebutuhan oksigen sebagian besar untuk penyusunan sel mikroorganisme (Djuarnani *et al.*, 2005). Konsumsi oksigen pada saat reaksi pada fase laju menurun sekitar 4-5 mol per kg sampah per hari. Pada fase ini oksigen diperlukan untuk penyusunan sel yang jumlahnya lebih sedikit jika dibandingkan dengan untuk pemeliharaan sel. Konsumsi oksigen yang dipergunakan untuk pemeliharaan sel sekitar 3 mol per kg sampah kering per hari.



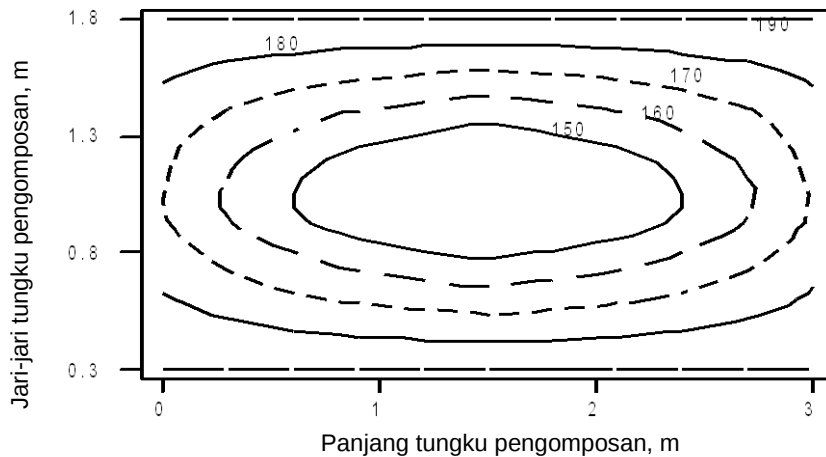
Gambar 5. Kesalahan laju konsumsi O_2 hasil model dan pengukuran

Laju konsumsi O_2 hasil model simulasi dengan hasil pengukuran selisihnya digambarkan pada Gambar 5. Kesalahan antara keduanya berkisar

antara -2.2 dan 1.8 mol/kg sampah kering, kesalahan terkecil 0.022 mol per kg sampah kering. Distribusi kesalahan independen terhadap waktu pengamatan.

Hubungan R_{O_2} hasil model simulasi dan R_{O_2} hasil pengukuran secara matematik dituliskan $y = 0.98x - 0.05$. Nilai r^2 adalah 0.95 dan nilai $E_{rr} = -0.05$ dengan total kesalahan mendekati nol. Dari nilai-nilai parameter statistik, gradient persamaan garis lurus mendekati 1, $r^2 > 0.75$, dan total kesalahan menurut Hogg dan Ledolter (1987) R_{O_2} hasil submodel simulasi valid.

Konsentrasi oksigen di dalam pori-pori sampah mengalami penurunan karena jumlah oksigen yang dikonsumsi dalam reaksi pengomposan lebih besar dengan laju difusi oksigen akibat perbedaan konsentrasi antara dua lapisan. Perbedaan konsentrasi oksigen setiap penambahan jari-jari 0.3 m sebesar rata-rata 1.05 g per kg udara.



Gambar 6. Konsentrasi O_2 hari ke-15

Konsentrasi gas oksigen pada masing-masing titik sangat dipengaruhi oleh difusivitas massa (D) dan laju konsumsi oksigen oleh mikroorganisme (R_{O_2}). Konsentrasi oksigen pada lapisan paling tengah atau $r = 0.9$ m, $L = 1.5$ m, dan konsentrasi di lingkungan seperti Gambar 6. Titik kritis untuk model simulasi adalah konsentrasi oksigen 120 g O_2 per kg udara atau 12% dari volume udara. Pada model simulasi, konsentrasi terendah adalah sekitar 90 g O_2 per kg udara atau di bawah titik kritis, tetapi reaksi kimia pengomposan masih terjadi secara aerob. Pada konsentrasi terendah dicapai pada saat reaksi pengomposan mencapai puncak.

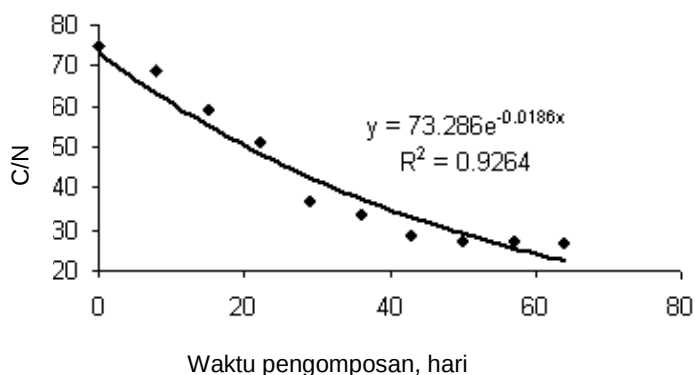
Kesalahan antara keduanya berkisar antara -1.72 g O_2 per kg udara dan 1.54 g O_2 per kg udara, kesalahan terkecil 0.02 g O_2 per kg udara. Distribusi kesalahan independen terhadap waktu pengamatan. Hubungan antara O_2 hasil model simulasi dan suhu hasil pengukuran dari beberapa uji validasi mendapatkan gradient persamaan garis lurus 0.92 dan 1.02 dengan r^2 antara 0.9 dan 0.94, dan nilai E_{rr} antara 0.25 dan 0.45. Nilai gradient persamaan garis lurus mendekati 1, nilai $r^2 > 0.75$, dengan total kesalahan (E_{rr}) mendekati harga nol, dan distribusi

kesalahan independen terhadap waktu, secara statistik menurut Hogg dan Ledolter (1987) model simulasi konsentrasi oksigen dinyatakan valid.

Variabel konsentrasi O_2 sangat peka terhadap perubahan variabel konsentrasi mikroorganisme awal. Kenaikan populasi awal mikroorganisme sebesar 20 % dari populasi awal, berakibat naiknya konsumsi oksigen dari rata-rata 3 mol per kg sampah kering menjadi 3.72 mol per kg sampah kering. Naiknya populasi mikroorganisme awal menyebabkan frekuensi pengadukan sampah naik dari setiap 14 hari sekali menjadi setiap 10 hari sekali.

Submodel simulasi konsentrasi O_2 yang tersedia di pori-pori sampah yang dikomposkan sangat peka terhadap perubahan variabel ketebalan tumpukan sampah. Nilai kepekaan perubahan variabel ketebalan tumpukan sampah terhadap perubahan variabel ketersediaan O_2 di tumpukan sampah adalah -1.519, hal ini berarti makin tebal tumpukan sampah ketersediaan O_2 makin kecil.

Dari Gambar 7 pada awal pengomposan sampai hari ke-8 C/N cenderung stabil, hal ini dikarenakan mikroorganisme masih beradaptasi dan saling berkompetisi sehingga sampah yang dapat diurai masih sedikit dan efektivitas enzim selulolitik dan lignolitik belum optimal karena suhu dan pH pengomposan. Namun, pada laju perkembangan mikroorganisme di fase logaritmik reaksi pengomposan cenderung meningkat tajam dan diikuti dengan penurunan secara tajam C/N, hal ini disebabkan enzim selulolitik dan lignolitik yang ada pada jaringan tanaman sudah berperan optimal.



Gambar 7. *Ratio* karbon nitrogen

Peningkatan reaksi kimia pengomposan menghasilkan gas CO_2 lebih besar dan konsumsi mikroorganisme terhadap glukose untuk penyusunan sel makin besar. Bahan sampah organik diurai oleh mikroorganisme menjadi asam amino, dan akhirnya diperlukan oleh mikroorganisme untuk menyusun selnya dalam jumlah yang lebih sedikit. Sel mikroorganisme terdiri dari 50% unsur karbon, 20% oksigen, dan 14% nitrogen, 8% hidrogen, 3% fosfor, 1% sulfur, dan dalam jumlah kecil K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , dan vitamin. Kedua hal inilah yang menyebabkan C/N menurun secara tajam.

Fase perkembangan mikroorganisme stasioner C/N menurun, tetapi tidak setajam pada fase logaritmik. Unsur-unsur hara dari reaksi kimia pengomposan untuk penyusunan sel mikroorganisme jenis termofilik di awal fase lebih banyak

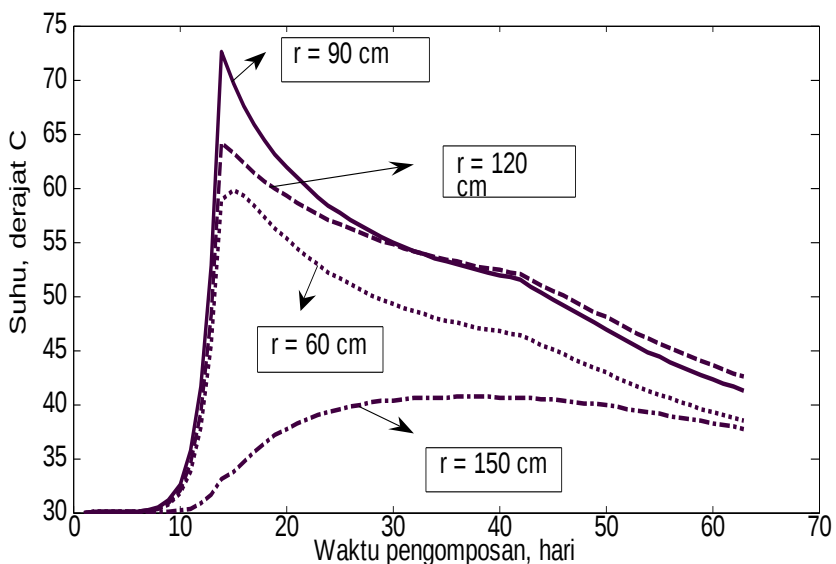
daripada unsur hara untuk pemeliharaan sel. Namun di akhir fase terjadi sebaliknya, unsur hara hanya untuk pemeliharaan sel mikroorganisme termofilik karena perkembangan mikroorganisme ini sudah tidak ada.

Pada fase perkembangan mikroorganisme menurun, C/N cenderung menurun dengan gradien sangat kecil. Hal ini disebabkan menurunnya reaksi kimia pengomposan, yang diikuti penurunan konsumsi unsur hara untuk pemeliharaan sel mikroorganisme karena penurunan populasi mikroorganisme.

Variabel keluaran yang peka terhadap perubahan C/N sampah di awal pengomposan adalah variabel waktu pengomposan. Hubungan antara C/N hasil model simulasi dan C/N hasil pengukuran secara matematik dituliskan $y = 0.996x + 0.406$. Nilai r^2 adalah 0.98 dan nilai $E_{rr} = 0.406$. Total kesalahan mendekati nol. Dari nilai-nilai parameter statistik gradient persamaan garis lurus, r^2 , E_{rr} , dan total kesalahan dapat disimpulkan bahwa model simulasi C/N valid.

Berdasarkan analisis kepekaan model simulasi, apabila C/N awal dinaikkan 20%, waktu yang diperlukan untuk mencapai C/N 30 dari C/N awal 70 adalah 4 minggu. Apabila populasi mikroorganisme dinaikkan 20% menjadi sekitar 7.2×10^8 waktu yang diperlukan untuk mencapai C/N 30 dari C/N awal 70 adalah 5 minggu. Langkah yang dapat diupayakan untuk menambah populasi awal mikroorganisme adalah dengan cara mencampur sampah baru dengan sampah yang umur pengomposannya mencapai 2 - 3 minggu.

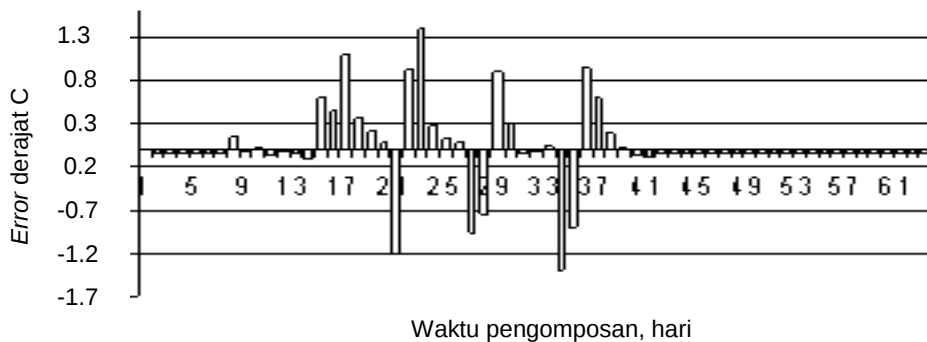
Suhu hasil model simulasi pada $L = 1.8$ m dan beberapa r digambarkan di Gambar 8.



Gambar 8. Suhu tumpukan sampah selama pengomposan untuk $r = 1.8$ m

Pada awal proses pengomposan, mikroorganisme pengomposan menyesuaikan dengan lingkungan. Oleh karena itu, aktivitasnya dalam mengurai sampah masih rendah. Hal ini disebabkan karena ada seleksi secara alami (Budiyanto, 2004). Dalam tahap ini, panas reaksi yang dihasilkan masih rendah

sehingga perubahan suhu agak lamban. Suhu di awal proses terus meningkat dari 30°C menjadi sekitar 35°C sampai hari ke-10. Namun, setelah mencapai 35°C, jenis mesofilik yang sudah terseleksi berkembang dengan cepat, hal ini ditandai dengan perubahan panas reaksi dan perubahan suhu sampai akhir minggu kedua mencapai puncaknya pada kedalaman pengomposan $r = 0.5$ m s/d $r = 1.5$ m. Pada fase mesofilik, kapang dan bakteri pembuat asam mengubah bahan makanan yang tersedia menjadi asam amino, gula dan pati (Djuarnani *et al.*, 2005). Jumlah mikroorganisme termofilik berkurang menyebabkan suhu turun sampai fase mesofilik atau suhu menjadi 37°C-45°C, hal ini menyebabkan mikroorganisme mesofilik yang tadinya tersembunyi aktif lagi merombak selulose dan hemiselulose yang tersisa sampai menjadi kompos.



Gambar 9. Kesalahan suhu hasil model simulasi dan hasil pengukuran

Suhu hasil model simulasi dengan hasil pengukuran untuk $r = 60$ cm, $r = 90$ cm, $r = 120$ cm, dan $r = 150$ cm selisihnya digambarkan pada Gambar 9. Kesalahan antara keduanya berkisar antara -2.7°C dan 2.6°C, kesalahan terkecil 0.12°C. Distribusi kesalahan independen terhadap waktu pengamatan. Hubungan antara suhu hasil model simulasi dan suhu hasil pengukuran dari beberapa uji validasi mendapatkan gradien persamaan garis lurus 0.95 sampai 1.04 dan r^2 antara 0.93 dan 0.99, dan nilai E_{rr} antara 0.57 dan 2.0. Nilai gradient persamaan garis lurus mendekati 1, nilai $r^2 > 0.75$, dengan total kesalahan (E_{rr}) mendekati harga nol, dan distribusi kesalahan independen terhadap waktu, secara statistik menurut Hogg dan Ledolter (1987) model simulasi suhu dinyatakan valid.

Suhu tumpukan sampah organik yang dikomposkan peka terhadap perubahan tebal tumpukan sampah dengan persamaan $y = 1.65 x$. Variabel keluaran suhu sangat dipengaruhi oleh ketebalan karena faktor ketebalan (dx), kerapatan massa, dan porositas berpengaruh pada difusi panas (α).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- (1) Model simulasi reaksi kimia dan reaksi biologis proses pengomposan sampah organik di bioreaktor berbentuk setengah silinder telah divalidasi

- melalui submodel populasi mikroorganisme, submodel simulasi R_{CO_2} , R_{O_2} , R_{H_2O} , dan suhu, serta submodel simulasi C/N.
- (2) Gradien garis lurus hubungan antarvariabel populasi mikroorganisme, R_{CO_2} , R_{O_2} , R_{H_2O} , suhu kompos, serta C/N hasil model simulasi dengan hasil percobaan berkisar 0.89-0.99, dengan r^2 berkisar 0.85-0.99.
 - (3) Variabel konsentrasi O_2 peka terhadap perubahan populasi mikroorganisme awal dan jari-jari reaktor. Kenaikan populasi awal mikroorganisme sebesar 20% berakibat naiknya konsumsi oksigen 0.72 mol per kg sampah organik kering.

Saran

Diperlukan penelitian secara lebih mendalam pada peran mikroorganisme dalam peningkatan efektivitas proses pengomposan skala lapangan, terutama penelitian tentang mikroorganisme pengurai sulfur, besi, dan protein.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiyanto, M.A.K. 2004. Mikrobiologi Terapan. Malang: Penerbit Universitas Muhamadiyah Malang.
- Djuarnani, N., Kristian, dan Setiawan, B.S. 2005. Cara Cepat Membuat Kompos. Tangerang: Agromedia Pustaka.
- Emerton, B.L., Mote, C.R., Dowlen, H.H., Allison, J.S., and Sanders, W.L. 1988. Comparison of forced and naturally aerated composting of dairy manure solids. *J Applied Engineering in Agriculture* 4(2):159 -164.
- Furedy, C. 1994. Decentralized composting: An emergencing technique of solid waste management. *ASEP Newsleter* 10(1): 1-12.
- Hobson, P.N. 1987. A model of some aspects of microba degradation of particulate substrates. *J Fermentation Teccology* 65(4):431-439.
- Hogg, R.V. and Ledolter, J. 1992. Aplied Statistics fo Engineers and Physical Scientists. New York: Macmillan Publishing Company.
- Inbar, Y., Chen, Y., Hadar, Y., and Verdonck, O. 1988. Composting of agricultural waste for their use as Container media: simulation of composting process. *J Biological waste* 26(4):247-249.
- McKinley, V.L., Vestal, J.R., and Eralp, A.E. 1985. Microbial activity in composting. *Biocycle*. 26, 47-50.
- Nakasaki, K., Nakano, Y., Akiyama, T., Scoda, M., and Kubota, H. 1987a. Oxygen diffusion and microbial activity in the composting of dehidrated sewage sludge cake. *J Fermentation Technology* 65(1): 43-48.

- Nakasaki, K., Kato, J., Akiyama, T., and Kubota, H. 1987b. Transformation of water soluble organic materials during thermophilic composting of sewage sludge. *J Fermentation Technology* 65(6): 675-681.
- Nakasaki, K., Kato, J., Akiyama, T., and Kubota, H. 1987c. A new composting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material. *J Fermentation Technology* 65(4): 441-447.