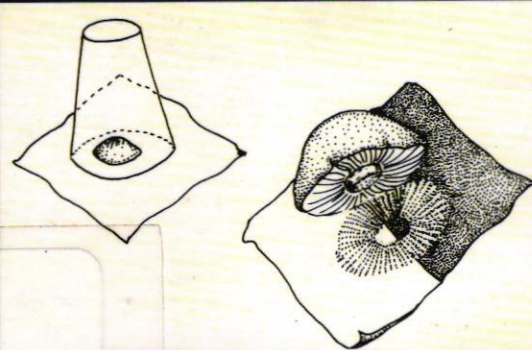




TEKNOLOGI PENGOMPOSAN



BALAI PENELITIAN TANAH

Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Departemen Pertanian

2009



KOMPOS

Prinsip Dasar dan Teknik Pengomposan

PENANGGUNG JAWAB

Dr. Ir. Sri Rochayati, M.Sc.

PENYUSUN

Edi Santosa
Surono
Ea Kosman
Erny Yuniarti

PENYUNTING PELAKSANA

Herry Sastramihardja
Farida Manalu
Sri Erita Aprillani

TATA LETAK

Didi Supardi

12/02/2013
80/R5-BT/B

Diterbitkan oleh:

BALAI PENELITIAN TANAH

Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

Departemen Pertanian

Jl. Ir. H. Juanda 98 Bogor 16123

Telp. (0251) 8336757, Fax (0251) 8321608

e-mail: soil-ri@indo.net.id

Website: <http://balittanah.litbang.deptan.go.id>

ISBN 978-602-8039-20-8

KATA PENGANTAR

Revolusi hijau telah mendorong penggunaan pupuk anorganik sebagai prioritas untuk meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman guna menopang kebutuhan pangan. Seiring dengan itu, penggunaan pupuk anorganik cukup mampu meningkatkan hasil tanaman sehingga dapat memenuhi kebutuhan pangan tetapi sekaligus memberikan dampak berkurangnya penggunaan pupuk organik. Bahkan ditinggalkannya pupuk organik oleh petani dalam usaha membudidayakan tanamannya.

Dampak penggunaan pupuk anorganik yang tidak mempertimbangkan sifat tanah dan kebutuhan tanaman telah menimbulkan permasalahan tersendiri terutama yang berlebihan pada produktivitas dan kesehatan tanah. Praktek penggunaan pupuk anorganik merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca seperti N_2O dan CH_4 yang berpengaruh pada pemanasan global. Kehilangan nitrogen dari pupuk N melalui proses volatilisasi NH_3 maupun emisi gas N_2O , selain mengakibatkan penggunaan pupuk tidak efisien juga menyebabkan dampak negatif pada lingkungan.

Untuk mengatasi masalah efisiensi pupuk dan penurunan kualitas lingkungan salah satunya adalah dengan gerakan penggunaan kembali pupuk organik seperti kompos yang bersumber dari sumber daya lokal. Pemanfaatan kompos bisa mensubstitusi penggunaan pupuk anorganik sehingga bisa mengatasi persoalan subsidi pupuk dengan mempertahankan atau bahkan meningkatkan produktivitas lahan dengan mempraktekkan pertanian yang ramah lingkungan. Selain hal tersebut penggunaan kompos juga dapat memperkecil fluktuasi suhu dan kelembapan tanah yang semakin meningkat akibat terjadinya perubahan iklim. Untuk menghasilkan kompos yang bermutu baik, diperlukan teknologi pengomposan yang selama ini telah teruji baik di laboratorium maupun lapangan.

Buku teknologi pengomposan ini merupakan buku penuntun pengomposan yang disusun secara komprehensif dengan menampilkan seluruh aspek teknologi pengomposan. Aspek teknologi tersebut dari skala laboratorium, teknologi penggunaan mikroba perombak bahan organik, sampai pengomposan dengan menggunakan aktivitas cacing tanah. Dengan diterbitkannya buku ini, diharapkan para pengguna mendapatkan tambahan pengetahuan dan manfaat tentang pengomposan tidak hanya pada tata cara atau tahapan pengomposan yang selama ini sudah biasa ditampilkan buku-buku yang bertema kompos dan pengomposan.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian buku ini.

Bogor, Desember 2009
Balai Penelitian Tanah,
Kepala,

Dr. Ir. Sri Rochayati, M.Sc.
NIP. 19570616 198603 2 001

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
I. KOMPOS DAN PENGOMPOSAN	1
1.1. Prinsip Dasar Pengomposan	2
1.2. Teknik Pengomposan	4
1.3. Proses Pengomposan	10
1.4. Pengkayaan Kompos dengan Bahan Mineral atau Mikroba	11
II. CARA PENGOMPOSAN DAN PENGKAYAAN KOMPOS	15
2.1. Latar Belakang	15
2.2. Pengomposan	16
2.3. Pengomposan Tandan Kelapa Sawit Skala Besar	22
2.4. Pengkayaan Kompos	24
III. TEKNOLOGI MIKROBA PENGURAI BAHAN ORGANIK	27
3.1. Teknologi Mikroba Selulolitik dan Aplikasinya	27
3.2. Teknologi Mikroba Lignolitik dan Aplikasinya	41
3.3. Uji Kemampuan Perombakan Baban Organik	46
3.4. Uji Patogenisitas	46
IV. TEKNOLOGI PENGEMBANGAN DAN PERBANYAKAN AGEN DEKOMPOSER SKALA PILOT	49
4.1. Perbanyakan Biomassa Mikroba Ligninoselulolitik	49
4.2. Formulasi	52
V. TEKNOLOGI BIO RECYCLE ORGANIC VERMI-COMPOSTING (TEKNOLOGI BRAVO)	55
5.1. Penyediaan Bahan Organik	56
5.2. Penyediaan Cacing Tanah	57
5.3. Pengomposan dengan Cacing Tanah	66
5.4. Keuntungan Vermikompos	71
5.5. Hama dan Penyakit Cacing Tanah	73

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Kadar hara di dalam beberapa jenis kompos	3
Tabel 2.	Bahan organik yang dapat dikomposkan	4
Tabel 3.	Beberapa nilai C/N bahan organik	5
Tabel 4.	Mikroba yang umum berasosiasi dalam tumpukan sampah	9
Tabel 5.	Bahan – bahan pengkaya kompos	12
Tabel 6.	Komposisi beberapa limbah pertanian (g kg ⁻¹ berat kering massa)	31
Tabel 7.	Rasio karbon-nitrogen beberapa limbah organik pertanian	32
Tabel 8.	Beberapa jenis cacing tanah yang telah berhasil dikembangkan	65
Tabel 9.	Jenis-jenis hara yang terdepositkan dalam proses dekomposisi beberapa bahan organik	72
Tabel 10.	Kandungan hara vermikompos hasil dekomposisi <i>Lumbricus rubellus</i> terhadap sumber bahan organik jerami, tangkos dan sampah pasar	72
Tabel 11.	Pengaruh pemberian cacing tanah <i>Pheretima hupiensis</i> terhadap sifat fisik tanah	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Suhu tumpukan pada proses pengomposan sampah kota yang dikomposkan dengan berbagai pupuk kimia dan memakai segitiga aerasi. Berdasarkan suhu tumpukan, waktu pengomposan dibedakan menjadi: awal (biru muda), proses degradasi intensif (oranye), dan proses pematangan (hijau gelap) (Sumber: Tim Peneliti Kompos, 1991)	7
Gambar 2.	Skema proses pengomposan aerobik	10
Gambar 3.	Bak pengomposan yang telah ditutup plastik dan pemanenan kompos jerami.	17
Gambar 4.	Skema peralatan pengomposan sampah kota, berupa: segitiga aerasi (A), alat pengangkut sampah dari tandu karung karuna (B), gacok (C) untuk sortasi dan mengambil sampah, dan garpu untuk membalik/membongkar tumpukan (D)	19
Gambar 5.	Skema tumpukan (<i>heap</i>) pengomposan sampah kota, proses pengomposan akan meningkatkan suhu tumpukan sehingga aliran udara (O ₂) secara otomatis masuk ke dalam tumpukan sampah melalui segitiga aerasi sehingga kelembapan dalam tumpukan merata dan pelepasan CO ₂ dan panas dari dalam tumpukan lancar	20
Gambar 6.	Skema penumpukan bahan pada pengomposan skala besar pada proses pengomposan bersuhu tinggi (modifikasi FAO No. 40, 1977)	23
Gambar 7.	Reaksi umum proses perombakan bahan organik oleh mikroba	30
Gambar 8.	Struktur selulosa	31
Gambar 9.	Pembuatan cetakan basidiospora pada kertas	36
Gambar 10.	Pemotongan tubuh buah dan pengambilan bagian kecil jaringan tubuh buah secara aseptik	38
Gambar 11.	(A) Fungi selulolitik pada media seleksi CMC (carboxymethyl cellulose) agar dan (B) Fungi selulolitik pada media PDA.	40
Gambar 12.	Struktur lignin (Burgess, 2008)	42
Gambar 13.	Gambaran lignin G4 yang terdegradasi oleh fungi diukur dengan GC/MS TMAH (Geib, 2008)	43
Gambar 14.	Beberapa jamur yang mengurai kayu	44
Gambar 15.	Fungi lignolitik yang diuji pada media agar selektif lignin – benomyl – guaiacol menunjukkan warna merah di sekitar koloninya (Fungsi lignolitik koleksi Surono SP., Balai Penelitian Tanah)	44

Gambar 16.	Uji patogenisitas, isolat contoh bukan merupakan mikroba patogen (A) dan isolat contoh merupakan mikroba patogen (B) dengan menunjukkan gejala nekrosis	46
Gambar 17.	Pemberian kompos bioaktif (menggunakan agen dekomposer <i>Trichoderma</i> sp. lignolitik) yang ditambah dengan konsorsia mikroba mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman caisim lebih baik (A) dibanding kontrol praktek petani yang menggunakan kompos 20 t ha ⁻¹ (B)	48
Gambar 18.	Biakan starter pada medium padat dan cair	50
Gambar 19.	Pertumbuhan <i>Aspergillus niger</i> Kar.21 dan <i>Trichoderma</i> sp. strain 69.G3 pada media PDB dengan pH awal 5.5 (Yuniarti, 2006)	51
Gambar 20.	Fermentor stainless steel 30 l, kapasitas 15 l	52
Gambar 21.	Biakan fungi yang telah dicacah dalam fermentor dan biakan fungi dalam wadah pengenceran	52
Gambar 22.	Siklus hidup cacing tanah	59
Gambar 23.	Cacing tanah adalah hewan hermaprodit (satu tubuh mempunyai dua jenis kelamin), namun untuk bisa melakukan pembuahan dua ekor cacing saling berkopulasi	60
Gambar 24.	Pohon klasifikasi cacing tanah model Herman's Adventure (http://www.urbanext.uiuc.edu/worms . 6 Sept 2004)	62
Gambar 25.	Kotak perbanyak cacing tanah terbuat dari papan dengan ukuran panjang x lebar dan tinggi masing-masing 1 m x 0,5 m x 0,5 m, diisi 30 - 40 cm media campuran tanah + rumen 2:1, ditambah TSP dan kapur masing-masing 1%, setiap bulan media diganti bersamaan panen cacing	65
Gambar 26.	Ember atau kotak (bersekat) tempat pengomposan skala kecil untuk sampah rumah tangga, ember/kotak dibagi dua dengan kawat ayam, bagian dasar diisi tanah 5 cm, bahan organik diisikan dari atas kotak ke sebelah bagian (kanan) dari kotak, setelah bahan organik turun setengahnya bahan organik diisikan lagi ke sebelah bagian (kiri) lainnya, demikian seterusnya bolak-balik. Kotak ditutup dengan kain blacu hitam. Panen vermikompos diambil dari atas	66
Gambar 27.	Bak pengomposan skala besar, lebar 3 - 5 m, panjang 6 - 10 m, tinggi 0,6 m, diisi tanah 10 cm, bahan organik diisikan bergantian kiri-kanan melalui bagian atas, cacing dimasukkan sebelum diisi bahan organik, bak ditutup polibag.	68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Media Isolasi dan Seleksi	78
Lampiran 2. Media Produksi Mikroba Dekomposer	82

I. KOMPOS DAN PENGOMPOSAN

Kegiatan pertanian yang dilakukan secara intensif tanpa disertai dengan penggunaan bahan organik dapat menyebabkan penurunan kadar C-organik dan berubahnya keseimbangan hara dalam tanah. Bila hal ini dibiarkan terus, maka proses penurunan produktivitas tanah akan tetap berlanjut dan dalam jangka panjang dapat mengganggu ketahanan pangan nasional.

Pengelolaan tanah sebaiknya diarahkan pada perbaikan struktur fisik, komposisi kimia dan aktivitas biota tanah yang optimum (Witt, 2004) sehingga interaksi antara abiotik dan biotik tanah memberikan keseimbangan yang optimal bagi keberlangsungan produktivitas lahan. Pada sistem tersebut diharapkan akan terbentuk agroekosistem yang stabil, pertumbuhan tanaman menjadi lebih baik, dan hasil meningkat tanpa merusak lingkungan.

Penurunan produktivitas tanah, khususnya hasil/produk pertanian, sangat tergantung dari cara pengelolaan tanah. Hal ini disebabkan pengelolaan tanah akan mempengaruhi kondisi tanah meliputi sifat-sifat fisik, kimia, dan biologi sehingga kesalahan di dalam pengelolaan tanah akan menurunkan sifat-sifat tanah tersebut. Kadar C-organik tanah merupakan salah satu faktor yang menentukan potensi hasil tanaman pangan. Tanah dengan kadar C-organik sekitar 2,5% dapat menyebabkan pencapaian separuh hasil dari produksi maksimum jagung, artinya bahwa bila kadar C-organik tanah < 2,5% menyebabkan hasil jagung mulai menurun. Oleh karena itu pengelolaan tanah pada lahan tanaman pangan intensif tanpa mengikutsertakan penggunaan bahan organik akan mengancam keberlanjutan produktivitas lahan tersebut.

Berbagai aktivitas mikroorganisme, mikroflora, dan fauna tanah saling mendukung bagi keberlangsungan proses siklus hara, membentuk *biogenic soil structure* yang mengatur terjadinya proses-proses fisik, kimia, dan hayati tanah. Berbagai mikroorganisme dapat meningkatkan kesuburan tanah, melalui produksi berbagai senyawa penting seperti zat organik pelarut hara, fitohormon, dan antipatogen. Beberapa mikroba diazotorop endofitik dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan melindungi *strees* tanaman melalui metabolisme zat tumbuh alami, meningkatkan ketersediaan hara dan bahan organik, serta sekresi senyawa antimikroba dan hama. Kemampuan mikroba dalam menambat N_2 , melarutkan P tak tersedia menjadi tersedia, menghasilkan zat tumbuh alami, merombak bahan organik sangat berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah.

Pengomposan merupakan salah satu upaya peningkatan efektivitas penggunaan bahan organik bagi pemeliharaan/peningkatan kadar C-organik tanah. Oleh karena itu di dalam upaya mempertahankan/memperbaiki produktivitas tanah, peningkatan pengetahuan, motifasi, dan ketrampilan petani terhadap pemanfaatan bahan organik dalam pengelolaan tanah mereka perlu terus digalakkan.

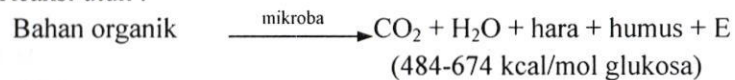
1.1. Prinsip Dasar Pengomposan

Secara alami bahan-bahan organik akan mengalami penguraian, baik secara aerobik maupun anaerobik, dengan bantuan mikroba maupun biota tanah lainnya. Namun proses pengomposan yang terjadi secara alami berlangsung lama/lambat dengan kualitas kompos yang rendah. Gaur (1982) mengemukakan proses alami peruraian bahan organik secara aerob dan anaerob sebagai berikut:

Secara aerob (Gaur 1982):

- Gula $(\text{CH}_2\text{O})_x + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{mikroba}} x \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{E}$
(Selulosa, hemiselulosa)
- N-organik $\longrightarrow \text{NH}_4^+ \longrightarrow \text{NO}_2^- \longrightarrow \text{NO}_3^- + \text{E}$
(Protein)
- S-organik (S) $+ x \text{O}_2 \longrightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{E}$
- P-organik $\longrightarrow \text{Ca}(\text{HPO}_4)$
(Phytin, lecitin)

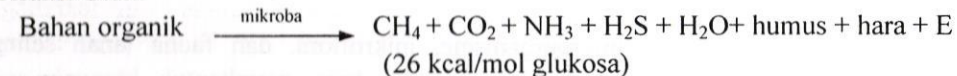
Reaksi utuh :



Secara anaerob (Gaur, 1982):

- $(\text{CH}_2\text{O})_x \xrightarrow{\text{bakteri pembentuk asam}} x \text{CH}_3\text{COOH} \xrightarrow{\text{Methanomonas}} \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- N-organik $\longrightarrow \text{NH}_3$
- S-organik $\longrightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} + \text{E}$

Reaksi Utuh:



Aktivitas mikroba dalam mengurai bahan organik memerlukan hara seperti N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe dan hara esensial lainnya. Hara tersebut diambil dari hara yang tersedia di lingkungannya, sehingga apabila bahan organik yang belum matang dimasukkan ke dalam tanah maka akan terjadi pengurasan hara oleh mikroba. Hal ini bisa berakibat terjadinya persaingan antara mikroba dengan tanaman sehingga tanaman bisa kekurangan hara, dengan demikian maka bisa menghambat pertumbuhan tanaman. Namun demikian, setelah mikroba mati hara yang berasal dari mikroba bisa dilepas kembali dan bisa dimanfaatkan oleh tanaman.

Hasil akhir proses peruraian bahan organik secara aerob adalah CO_2 , H_2O , hara, humus, dan E (energi = panas). CO_2 dilepas ke udara, H_2O sebagian menguap dan sebagian mengalir (*leaching*) ke tanah, hara kembali ke dalam tanah atau dimanfaatkan tanaman untuk memenuhi kebutuhannya, humus mengandung gugus-gugus reaktif yang mempunyai kapasitas tukar kation (KTK) tinggi sehingga dapat

meningkatkan daya erap terhadap hara tanah menyebabkan hara tersebut tidak mudah hilang dari tanah, dan energi (E) dilepas dalam bentuk panas. Beberapa contoh kandungan hara dan KTK kompos seperti Tabel 1. Demikian pula hasil akhir proses peruraian bahan organik secara anaerob, perbedaannya adalah dihasilkan gas metana (CH_4) yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi (gas bio) dan E (panas) yang dihasilkan lebih rendah dibanding proses aerob.

Tabel 1. Kadar hara di dalam beberapa jenis kompos

No.	Jenis kompos	C/N	Kadar hara				Kapasitas tukar kation (KTK)
			N	P	K	Mg	
			%	ppm			Cmol/g
1	Pukan ayam	17	4,9	1,8	2,5	1,0	34,6
2	Pukan kelinci	8	4,8	1,4	0,9	0,5	28,9
3	Pukan kambing	13	3,3	0,7	3,3	0,9	33,2
4	Jerami	20	1,5	0,2	2,1	0,2	-
5	Jerami+legum	18	1,9	0,3	2,1	0,4	-
6	Gambut rawa pening	22	1,3	0,1	0,1	0,2	85,5
7	Sampah kota	8	0,7	0,7	0,6	0,5	16,1
8	Kascing	12	1,4	1,2	3,1	0,5	138

Proses peruraian/pengomposan secara alami berjalan lambat tetapi dengan merekayasa proses alami tersebut waktu pengomposan dapat dipercepat. Untuk mempercepat proses pengomposan ini telah banyak dikembangkan teknologi-teknologi pengomposan. Baik pengomposan dengan teknologi sederhana, sedang, maupun teknologi tinggi. Pada prinsipnya pengembangan teknologi pengomposan didasarkan pada proses penguraian bahan organik yang terjadi secara alami. Proses penguraian dioptimalkan sedemikian rupa sehingga pengomposan dapat berjalan dengan lebih cepat dan efisien. Teknologi pengomposan saat ini menjadi sangat penting artinya terutama untuk mengatasi permasalahan limbah organik, seperti untuk mengatasi masalah sampah di kota-kota besar, limbah organik industri, serta limbah pertanian dan perkebunan.

Teknologi pengomposan telah berkembang dan sangat beragam, tergantung dari macam dan jumlah bahan yang dikomposkan. Beberapa teknologi tersebut menggunakan aktivator pengomposan yakni mikroba dekomposer hasil isolasi, seleksi dan uji kemampuan dalam mendegradasi bahan organik. Beberapa biodekomposer telah diproduksi secara masal, beredar di pasaran dan telah dipakai untuk medegradasi limbah organik, antara lain: M-Dec, ActiComp, OrgaDec, EM4, PROMI, SuperDec, Green Phoskko Organic Decomposer, SUPERFARM (*effective microorganism*), dan lainnya (<http://id.wikipedia.org/wiki/kompos>. Desember 2009).

1.2. Teknik Pengomposan

Kompos adalah hasil penguraian bahan organik secara parsial/tidak lengkap yang dapat dipercepat secara artifisial dengan menambahkan berbagai mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembab, dan aerobik atau anaerobik. Sedangkan menurut FAO (2003) kompos adalah hasil proses perombakan/dekomposisi bahan organik secara alamiah oleh organisme tanah dalam kondisi terkontrol.

Pengomposan adalah proses peruraian bahan organik secara biologis, khususnya oleh mikroba dekomposer yang memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi. Membuat kompos adalah mengatur dan mengendalikan proses tersebut agar kompos dapat terbentuk lebih cepat dengan kualitas yang lebih baik. Proses ini meliputi pencampuran bahan untuk mendapatkan $C/N < 40$, penumpukan bahan dan penambahan biodekomposer (bila memakai bioaktivator) serta mengontrol kecepatan proses pengomposan dengan mengendalikan/menjaga kelembapan dan suplai O_2 (aerasi) dalam tumpukan.

Pengomposan secara aerob paling banyak dilakukan, karena cara ini proses pengomposan lebih cepat, mudah, dan murah. Sedangkan pengomposan secara anaerobik biasanya dilakukan terhadap bahan organik dari limbah kotoran ternak dengan bantuan mikroorganisme metanogen (penghasil metan misal: bakteri *Methanomonas*), tidak membutuhkan O_2 dan gas metan yang dihasilkan bisa ditampung dipakai sebagai sumber energi (biogas).

Bahan baku pengomposan adalah semua material organik yang mengandung karbon dan nitrogen, seperti kotoran hewan, sampah hijau, sampah kota, lumpur cair dan limbah industri pertanian. Berikut disajikan bahan-bahan yang umum dijadikan bahan baku pengomposan.

Tabel 2. Bahan organik yang dapat dikomposkan

Asal limbah	Bahan
1. Pertanian	
Limbah tanaman	Jerami dan sekam padi, gulma, batang dan kulit jagung, semua bagian vegetatif tanaman semusim, dan dedaunan tanaman tahunan
Limbah ternak	Kotoran ternak, limbah dari rumah pemotongan hewan, air seni ternak, limbah pakan ternak, bulu dan bagian ternak lainnya
Tanaman air	Paku air, rumput-rumput air, enceng gondok, dan gulma air lainnya
2. Industri	
Limbah padat	Serbuk gergaji kayu, blotong, ampas tebu, limbah kelapa sawit, limbah pengalengan makanan, limbah pengolahan ikan, dan limbah pemotongan hewan
3. Limbah rumah tangga	
Sampah	Sampah rumah tangga dan sampah pasar

Supaya proses pengomposan berlangsung cepat dan menghasilkan kompos yang bermutu (kematangan cukup dan kaya hara) tinggi, maka dalam pengomposan perlu memperhatikan prinsip – prinsip pengomposan sebagai berikut:

1.2.1. Nilai C/N

Nilai C/N bahan yang dikomposkan berkisar antara 30 – 40, hal ini diperlukan karena rata-rata mikroba setiap mendegradasi 30 bagian C memerlukan 1 bagian N sehingga pada nilai C/N tersebut unsur N tidak merupakan faktor pembatas, proses pengomposan bisa berjalan cepat. Jika nilai C/N lebih besar dari 40 maka proses pengomposan berjalan lambat, sebaliknya jika C/N kurang dari 30 akan banyak kehilangan N dalam bentuk ammonia.

Beberapa nilai C/N bahan organik seperti pada Tabel 3. Bahan – bahan yang mempunyai C/N lebih besar dari 40 perlu ditambahkan urea atau dicampur dengan bahan yang mempunyai C/N rendah seperti tanaman legum atau kotoran ternak campuran bahan tersebut mempunyai nilai C/N antara 30 – 40.

Tabel 3. Beberapa nilai C/N bahan organik

No.	Macam bahan organik	C/N
1	Dedaunan tanaman berkayu	35 - 85
2	Tanaman jagung	60 - 80
3	Jerami padi	60 - 80
4	Gambut	58 - 90
5	Kertas koran	50 - 200
6	Serbuk gergaji	50 - 625
7	Kulit singkong	60 - 64
8	Tandan kelapa sawit	70 - 80
9	Ampas tebu	150 - 2001

1.2.2. Kelembapan

Kelembapan bahan yang akan dikomposkan berkisar antara 50 – 65%. Hal ini disebabkan mikroba dapat mendekomposisi bahan organik jika lingkungannya dalam keadaan lembab. Dalam keadaan lembab proses-proses fisik seperti imbibisi, osmosis dan aliran masa bagi unsur-unsur yang diperlukan mikroba dapat berjalan lancar sehingga dalam keadaan tersebut suplai hara bagi mikroba akan terpenuhi.

Kelembapan bahan $< 40\%$ akan menghambat proses pengomposan, demikian pula kelembapan $> 70\%$ proses pengomposan terhambat karena suplai O_2 berkurang dan terjadi proses anaerob disertai timbulnya bau busuk. Oleh karena itu bahan yang kering perlu dibasahi dan sebaliknya bahan yang terlalu basah perlu

dikeringanginkan atau ditambah bahan yang lebih kering (misalnya: abu dapur, serbuk gergaji) sehingga kelembapan mencapai 50 – 65%. Kelembapan ini dipertahankan selama proses pengomposan berlangsung,

1.2.3. Aerasi

Penumpukan bahan kompos diusahakan tidak terlalu padat sehingga pori-pori (ruang udara) di dalam tumpukan bahan yang dikomposkan berkisar antara 30 – 35%. Keadaan ini diperlukan supaya udara bisa mengalir ke dalam tumpukan untuk mencukupi suplai O_2 yang diperlukan untuk proses penguraian bahan organik yang dikomposkan. Selain hal tersebut, dengan adanya aliran udara akan terjadi pemerataan kelembapan dalam tumpukan, pelepasan CO_2 dan pelepasan panas dari dalam tumpukan. Aliran udara secara otomatis akan terjadi, karena proses pengomposan menghasilkan panas, sehingga terbentuk perbedaan tekanan udara. Tekanan udara pada bagian yang panas akan lebih rendah, hal ini menyebabkan terjadinya aliran udara dari bagian yang bertekanan tinggi ke bagian yang bertekanan lebih rendah.

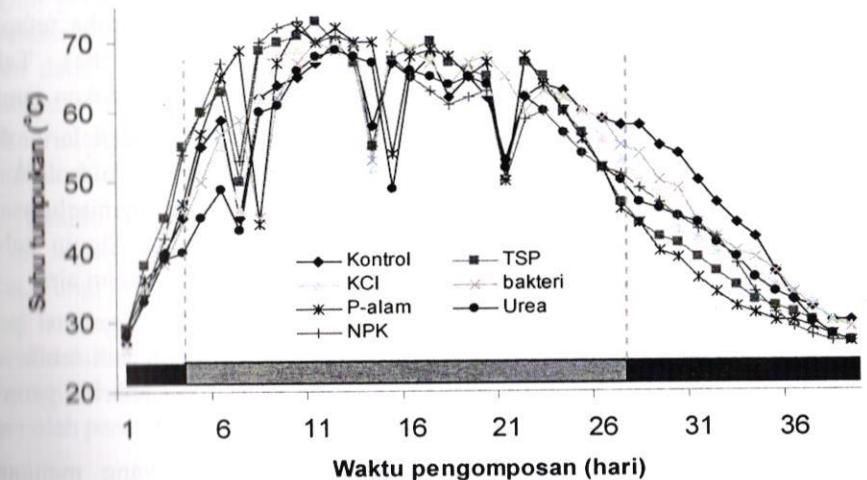
1.2.4. Ukuran bahan

Dalam mendegradasi bahan organik, pada mulanya serangan/aktivitas mikroba dimulai di permukaan bahan sehingga jika permukaan area bahan lebih luas akan meningkatkan kesempatan mikroba untuk menyerang bahan tersebut karena tidak ada persaingan antara mikroba dekomposer dalam penggunaan tempat. Oleh karena itu jika permukaan bahan lebih luas maka proses dekomposisi akan berjalan lebih cepat. Ukuran bahan juga menentukan besarnya ruang udara antar bahan (porositas). Ukuran bahan yang sangat kecil akan menyebabkan tumpukan bahan cepat memadat. Untuk meningkatkan luas permukaan dapat dilakukan dengan memperkecil ukuran partikel bahan tersebut dengan cara pencacahan bahan yang akan dikomposkan.

1.2.5. Suhu

Panas dihasilkan dari aktivitas mikroba, semakin tinggi suhu tumpukan bahan yang dikomposkan semakin tinggi aktivitas mikroba dekomposer dan semakin tinggi pula penggunaan O_2 , sehingga proses penguraian akan semakin cepat. Jika kelembapan bahan yang dikomposkan $\pm 60\%$, peningkatan suhu segera terjadi setelah *heap* (tumpukan bahan kompos) terbentuk. Suhu akan berkisar antara 50 – 75°C pada aktivitas pengomposan yang cepat. Pada suhu tersebut akan membunuh sebagian besar mikroba termasuk mikroba patogen, hanya mikroba termofilik saja yang akan tetap bertahan hidup.

Pada proses pengomposan, pengamatan suhu tumpukan bahan yang dikomposkan merupakan hal yang cukup penting. Pada awal pengomposan suhu tumpukan bahan yang dikomposkan meningkat dari setara suhu kamar menjadi $\leq 50^\circ C$, kemudian diikuti peningkatan suhu menjadi 70 – 80°C dan penurunan kembali menjadi $\geq 50^\circ C$ merupakan proses degradasi intensif. Proses pematangan kompos berlangsung pada suhu $\leq 50^\circ C$ – suhu kamar atau $\leq 35^\circ C$.



Gambar 1. Suhu tumpukan pada proses pengomposan sampah kota yang dikomposkan dengan berbagai pupuk kimia dan memakai segitiga aerasi. Berdasarkan suhu tumpukan, waktu pengomposan dibedakan menjadi: awal (biru muda), proses degradasi intensif (oranye), dan proses pematangan (hijau gelap) (Sumber: Tim Peneliti Kompos, 1991)

1.2.6. pH

Proses pengomposan dapat terjadi pada kisaran pH yang lebar. pH yang optimum untuk proses pengomposan berkisar antara 6,5 – 7,5. pH kotoran ternak umumnya berkisar antara 6,8 hingga 7,4. Proses pengomposan sendiri akan menyebabkan perubahan pada bahan organik dan pH bahan itu sendiri. Sebagai contoh, proses pelepasan asam, bersifat sementara, akan menyebabkan penurunan pH (pengasaman), sedangkan produksi amonia dari senyawa-senyawa yang mengandung nitrogen akan meningkatkan pH pada fase-fase awal pengomposan. pH kompos yang sudah matang biasanya berkisar 6,9 – 7,8.

1.2.7. Agen hayati (biodekomposer)

Agen hayati tanah sebagai biodekomposer mencakup mikroorganisme dan fauna tanah (umumnya cacing tanah). Agen pengompos ini mendegradasi bahan organik untuk mendapatkan enersi dan hara bagi pertumbuhan dan perkembangannya.

Mikroba dekomposer merupakan aktivator biologis yang tumbuh alami pada berbagai substrat organik. Penggunaan mikroba pengompos tertentu dimaksudkan untuk mempercepat proses pengomposan dan meningkatkan mutu kompos. Jumlah dan jenis mikroba menentukan keberhasilan proses pengomposan. Proses pengomposan secara alami tidak hanya dilakukan satu jenis mikroba tetapi oleh berbagai mikroba yang saling komplementer (konsorsia mikroba). Tabel 4 menyajikan beberapa jenis mikroba yang banyak terdapat dalam tumpukan sampah.

Mikroba memetabolisme partikel bahan organik yang tidak larut dengan memproduksi dua sistem enzim ekstra seluler yaitu sistem hidrolitik yang menghasilkan hidrolase berfungsi untuk degradasi selulosa dan hemiselulosa serta sistem oksidatif yang bersifat lignolitik untuk mendepolimerasi lignin sehingga bahan organik yang berukuran besar menjadi lebih kecil dan larut dalam air.

Beberapa jenis bakteri dan aktinomisetes mampu mendegradasi polimer selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Namun kemampuannya ini masih lebih rendah dibanding fungi. Bakteri berperan terutama pada degradasi polisakarida yang lebih sederhana.

Bakteri dekomposer terdapat di sembarang tempat yang mengandung senyawa organik berasal dari sisa-sisa tanaman maupun hewan yang telah mati, baik di laut maupun darat. Sebagian bakteri hidup secara aerob (membutuhkan O₂), sebagian anaerob (tanpa O₂) dan sebagian lainnya dapat hidup aerob maupun anaerob (fakultatif aerob/anaerob). Beberapa jenis bakteri aktif pada suhu 35 – 45°C (kelompok mesofil) dan sebagian lainnya pada suhu ≥ 45 °C (kelompok termofil). Dalam mendegradasi bahan organik, bakteri biasanya hidup bebas di luar organisme lain, tetapi ada sebagian bakteri yang hidup di dalam saluran pencernaan hewan (mamalia, rayap, dll). Secara alami proses degradasi rantai C (polisakarida) yang lebih kompleks seperti lignin dan selulosa, lebih lambat dibanding dengan senyawa sakarida yang lebih sederhana (amilum, disakarida, dan monosakarida). Demikian pula degradasi rantai N (polipeptida) yang lebih kompleks seperti keratin, lebih lambat dibanding dengan senyawa N yang lebih sederhana (protein dan asam amino).

Fungi (cendawan) terdapat di setiap tempat terutama di darat dalam berbagai bentuk, ukuran, dan warna. Pada umumnya mempunyai kemampuan yang lebih baik dibanding bakteri dalam mendekomposisi sisa tanaman (lignin, selulosa, dan hemiselulosa). Sebagian besar fungi bersifat mikroskopis (hanya bisa dilihat dengan mikroskop), hanya kumpulan miselium dan spora yang terlihat mata. Tetapi fungi dari kelas Basidiomycetes dapat terlihat mata, disebut makrofungi. Makrofungi

berkembang biak dengan spora yang dihasilkan di dalam bangunan berbentuk seperti payung, kuping, koral atau bola. Beberapa jenis makrofungi telah dibudidayakan untuk dikonsumsi. Pertumbuhan hifa Basidiomycetes dan Ascomycetes (diameter hifa 5-20 µm) lebih mudah menembus dinding sel tubular yang merupakan penyusun utama jaringan kayu (lignin). Pertumbuhan hifa maupun miselium (kumpulan hifa) dapat menekan dinding sel substrat dan sekresi enzim melarutkan dinding sel jaringan kayu sehingga proses degradasi bahan semakin cepat.

Dekomposisi residu tanaman yang terdiri atas kompleks polimer selulosa dan lignin yang merupakan komponen polimer erat kaitannya dengan kerja enzim ekstraseluler yang disekresikan/dihasilkan fungi. Beberapa enzim ekstraseluler yang berperan dalam degradasi bahan organik antara lain adalah β-glukosidase, lignin peroksidase (LiP), manganase peroksidase (MnP), dan lakase. Enzim-enzim ini dihasilkan oleh berbagai fungi antara lain *Pleurotus eryngii*, *P. Ostreatus*, dan *Bjekkendera adusta*.

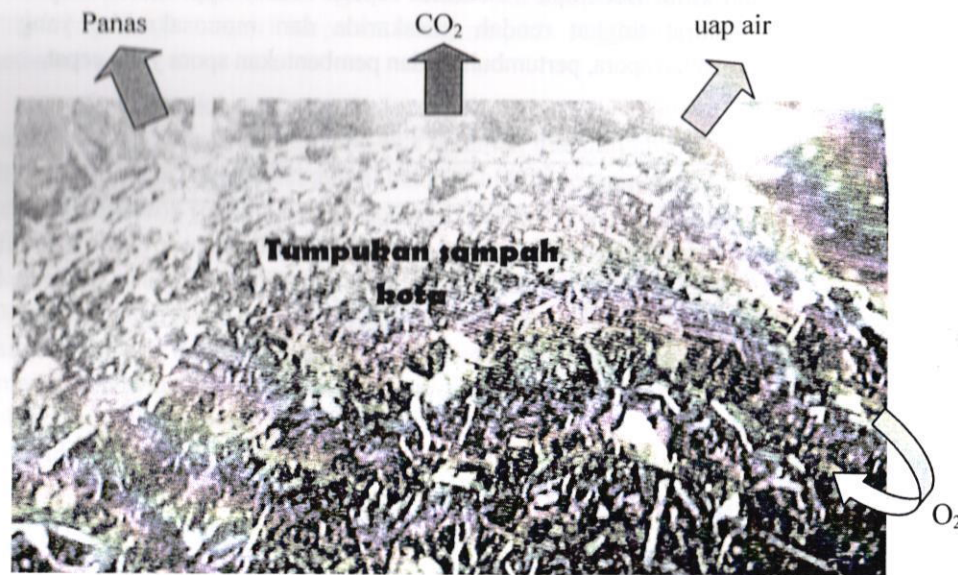
Residu tanaman yang mengandung sejumlah senyawa organik yang larut dalam air seperti asam amino, asam organik, dan gula dapat langsung digunakan mikroba. Fungi dari kelas Zygomycetes (Mucorales) sebagian besar berperan sebagai pengurai amilum, protein, dan lemak, dan hanya sebagian kecil yang mampu mengurai selulosa dan kitin. Beberapa Mucorales seperti *Mucor* spp. dan *Rhizopus* spp. mengurai karbohidrat tingkat rendah (disakarida dan monosakarida) yang dieirikan oleh perkecambahan spora, pertumbuhan, dan pembentukan spora yang cepat.

Tabel 4. Mikroba yang umum berasosiasi dalam tumpukan sampah

Kelompok	Bakteri	Fungi
Mesofil	<i>Pseudomonas</i> spp. <i>Achromobacter</i> spp. <i>Bacillus</i> spp. <i>Flavobacterium</i> spp. <i>Clostridium</i> spp. <i>Streptomyces</i> spp.	<i>Alternaria</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Humicola</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Pleurotus</i> spp. <i>Bjekkendera</i> spp.
Termofil	<i>Bacillus</i> spp. <i>Streptomyces</i> spp. <i>Thermoactinomyces</i> spp. <i>Thermus</i> spp. <i>Thermonospora</i> spp. <i>Microplasma</i> spp.	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Mucor pusillus</i> <i>Chaetomium thermophole</i> <i>Humicola lanuginose</i> <i>Absidia ramosa</i> <i>Sporotrichum thermophole</i> <i>Torula thermophole</i> (yeast) <i>Thermoascus aureanticus</i> <i>Trichoderma</i> spp.

1.3. Proses Pengomposan

Proses pengomposan akan segera berlangsung setelah bahan-bahan mentah dicampur, hal ini bisa diketahui dengan meningkatkan suhu tumpukan. Proses pengomposan secara sederhana dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap aktif dan tahap pematangan. Selama tahap-tahap awal proses, oksigen dan senyawa-senyawa yang mudah terdegradasi akan segera dimanfaatkan oleh mikroba mesofilik. Suhu tumpukan kompos akan meningkat dengan cepat. Demikian pula akan diikuti dengan penurunan pH kompos. Suhu akan meningkat hingga di atas 60° C. Suhu akan tetap tinggi selama waktu tertentu. Mikroba yang aktif pada kondisi ini adalah mikroba termofilik, yaitu mikroba yang aktif pada suhu tinggi. Pada saat ini terjadi dekomposisi/penguraian bahan organik yang sangat aktif. Mikroba-mikroba di dalam kompos dengan menggunakan oksigen akan menguraikan bahan organik menjadi CO₂, hara, uap air dan panas. Setelah sebagian besar bahan telah terurai, maka suhu akan berangsur-angsur mengalami penurunan. Pada saat ini terjadi pematangan kompos tingkat lanjut, yaitu pembentukan kompleks humus. Selama proses pengomposan akan terjadi penyusutan volume maupun biomassa bahan. Pengurangan ini dapat mencapai 40 – 50% dari volume/bobot awal bahan.



Gambar 2. Skema proses pengomposan aerobik

Pengendalian proses pengomposan

Proses pengomposan perlu dikendalikan supaya bisa berlangsung dengan cepat, merata, tidak kehilangan hara, mematikan mikroba patogen, dan mematikan bibit gulma sehingga kompos yang dihasilkan bermutu tinggi. Oleh karena itu harus diciptakan kondisi yang ideal bagi proses pengomposan berupa pengendalian kondisi lingkungan dalam tumpukan bahan yang optimal bagi proses pengomposan. Tumpukan bahan tersebut merupakan habitat bagi kehidupan mikroba sehingga kadar air, udara (O₂), karbon (C) dan unsur lainnya harus mendukung bagi keberlangsungannya proses pengomposan. Dengan demikian maka selama proses pengomposan berlangsung, perlu dilakukan beberapa pengukuran terhadap tumpukan bahan yang dikomposkan sebagai berikut:

1. Pengukuran nilai C/N: pada awal pengomposan.
2. Pengukuran kelembapan: pada tiap 2 - 4 hari sekali
3. Pemeriksaan suhu tumpukan: pada tiap 2 - 4 hari sekali
4. Periksa aerasi: pada tiap 2 - 4 hari sekali
5. Pengamatan volume tumpukan.

Kelima cara pengukuran/pengamatan di atas seperti dikemukakan pada Bab II (cara pengomposan dan pengkayaan kompos).

Mutu kompos

1. Kompos yang bermutu adalah kompos yang telah terdekomposisi dengan sempurna serta tidak menimbulkan efek-efek merugikan bagi pertumbuhan tanaman.
2. Kompos yang baik memiliki beberapa ciri sebagai berikut:
 - Berwarna coklat tua hingga hitam mirip dengan warna tanah,
 - Tidak larut dalam air, meski sebagian kompos dapat membentuk suspensi,
 - Nisbah C/N sebesar 15 – 25
 - Dapat meningkatkan kesuburan tanah,
 - Suhnya ≤ 35 atau setara dengan suhu lingkungan
 - Tidak berbau.
3. Kompos yang akan diperdagangkan harus memenuhi persyaratan Permentan nomor 28/Permentan/SR.130/5/2009 tentang Pupuk Organik, Pupuk Hayati dan Pembenah Tanah.

1.4. Pengkayaan Kompos dengan Bahan Mineral atau Mikroba

Kadar hara N, P, K, dan lainnya dalam kompos sangat rendah jika dibanding dengan kadar hara dalam pupuk buatan. Oleh karena itu untuk meningkatkan kualitas dan kandungan hara dalam pupuk organik diperlukan teknik pengkayaan dan

peningkatan kandungan nutrisinya. Salah satu usaha yang memungkinkan untuk meningkatkan kualitas pupuk organik adalah dengan pengkayaan mikroba tanah yang mempunyai peran sebagai penambat N, pelarut fosfat, penyedia K, dan dekomposer bahan organik. Inokulasi dan aplikasi mikroba meningkatkan kandungan N dalam kompos perkotaan sebanyak 24 – 30%. Penelitian sekarang ini lebih banyak dilakukan untuk memperbaiki kandungan nutrisi dan kualitas kompos melalui inokulasi konsorsium mikroba dan bahan alami seperti batuan fosfat.

Pada saat ini telah banyak dikembangkan teknologi alternatif untuk mendukung peningkatan produktivitas tanah dan tanaman. Salah satu teknologi alternatif yang potensial adalah pemanfaatan kompos bioaktif. Kompos bioaktif merupakan kompos hasil proses penguraian bahan organik dengan menggunakan agen hayati dekomposer seperti *Trichoderma* sp. yang sekaligus berperan sebagai antagonis patogen, diperkaya dengan mikroba bermanfaat dan bahan alami seperti batuan fosfat. Sehingga pupuk organik yang diperkaya mineral atau mikroba mempunyai fungsi dan peranan yang lebih besar dalam mendukung produktivitas tanah – tanaman.

Semakin maraknya gerakan pertanian organik, maka prospek pengembangan pupuk organik yang diperkaya dengan mineral atau mikroba bermanfaat dan bahan alami yang disebut sebagai produk kompos yang diperkaya atau kompos bioaktif akan dapat meningkatkan kualitas kompos.

Pengkayaan bahan mineral dapat dilakukan pada saat mulai, sedang atau akhir pengomposan dengan cara menambahkan/mencampur mineral tersebut sebanyak 5% dari berat kompos. Beberapa bahan yang bisa dipakai untuk pengkayaan kompos seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Bahan – bahan pengkaya kompos

No.	Bahan	Sumber hara				
		N	P	K	Ca	Mg
1	P-alam	-	< 11%	-	+	-
2	Batu granit	-	-	+	-	-
3	Feldpar	-	-	+	-	-
4	Kapur pertanian	-	-	-	+	-
5	Dolomit	-	-	-	+	+
6	Bunga bakung	+	+	+	+	+
7	Bonggol/batang pisang	-	-	34 – 42%	-	-
8	Tepung tulang	2 – 4%	9 – 11%	-	-	-
9	Darah kering	+	+	+	+	+
10	<i>Tithonia</i> sp.	+	+	+	+	+
11	Batang tumbuhan merambat	-	-	1%	4%	1%

Data diolah dari berbagai sumber

Sedangkan bahan pengkaya mikroba meliputi konsorsium mikroba tanah yang bermanfaat (penambat N₂, pelarut P dan K, penghasil zat pemacu produksi tanaman dan anti patogen) dari hasil seleksi, mikroorganisme lokal (MOL) yang dibuat petani dan mikroba lainnya. Kompos/pupuk organik yang akan diperkaya dengan mikroba sebaiknya yang telah betul-betul masak. Inokulan konsorsium mikroba tanah dicampurkan secara hati-hati ke dalam pupuk organik dengan perbandingan 1 : 5 antara inokulan dan pupuk organik (v/w). Setelah pemberian mikroba kemudian pupuk organik diinkubasi selama $\pm$ 7 hari untuk memberi kesempatan mikroba dapat berkembang di dalam kompos.

II. CARA PENGOMPOSAN DAN PENGKAYAAN KOMPOS

2.1. Latar Belakang

Isu *climate change* (perubahan iklim) sekarang ini telah menjadi bagian dari kehidupan kita sehari – hari. Dampak perubahan iklim dapat berupa banjir yang melanda sebagian wilayah dan pada waktu yang bersamaan terjadi kekeringan di wilayah lain, perubahan musim yang sering tidak dapat diperkirakan, emisi gas rumah kaca, meningkatnya suhu udara dan lain sebagainya. Hal ini dapat mengakibatkan penurunan produktivitas tanah dan khususnya keberhasilan usaha pertanian.

Salah satu upaya untuk mengurangi pengaruh buruk perubahan iklim terhadap keberhasilan usaha pertanian adalah pemanfaatan dan pengelolaan bahan organik *in situ*. Ketepatan pengelolaan bahan organik serta hara tanaman akan menciptakan keberlanjutan fungsi sumber daya lahan, lingkungan, dan produktivitas tanah. Keberadaan bahan organik di dalam tanah akan dapat memperkecil fluktuasi suhu dan kelembapan tanah, mempertahankan populasi dan keanekaragaman hayati tanah, memperbaiki agregasi dan ketahanan tanah terhadap hantaman air hujan maupun cekaman fisik lainnya. Pengomposan adalah salah satu cara pengelolaan bahan organik yang tepat untuk memperoleh manfaat yang terbesar bagi penggunaan bahan organik untuk pelestarian produktivitas tanah.

Dalam proses pengomposan, agen hayati tanah seperti bakteri, fungi dan aktinomiset berperan penting dalam pendegradasian bahan – bahan organik seperti limbah pertanian, sampah pasar, limbah rumah tangga, limbah pabrik, dan buangan organik lainnya. Bahan-bahan tersebut diolah menjadi pupuk organik sehingga selain bisa mengurangi penggunaan pupuk kimia dalam budi daya tanaman juga akan meningkatkan kebersihan/kualitas lingkungan. Selain hal tersebut, pemanfaatan kompos dalam pertanian diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemakaian pupuk kimia sehingga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca seperti CH_4 dan N_2O yang dihasilkan dari aplikasi pupuk kimia maupun pabrikasi pembuatan pupuk.

Berbagai teknologi pengomposan telah banyak dikembangkan, tetapi dalam kesempatan ini dikemukakan beberapa teknologi pengomposan aerob dengan atau tanpa menggunakan biodekomposer komersial. Teknologi ini secara praktis dapat dikerjakan pada skala kecil, menengah, dan besar sehingga pemanfaatan bahan organik *in situ* secara berkelanjutan dapat dilaksanakan oleh para petani ataupun pengusaha kompos. Oleh karena itu praktek pengomposan dalam jangka panjang diharapkan menjadi salah satu subsistem dalam kegiatan pertanian. Tahapan penting dalam pengomposan meliputi: (1) persiapan lokasi dan bahan pengomposan lainnya (air, inokulan perombak bahan organik, plastik penutup berwarna gelap, dll); (2) persiapan bahan yang akan dikomposkan (jerami, sisa-sisa tanaman lain, sampah,

dll); (3) penumpukan bahan; (4) pemeliharaan, meliputi: Pengukuran suhu, pembalikan, dan pengontrolan kelembapan tumpukan bahan kompos; dan (5) panen kompos.

2.2. Pengomposan

Cara pengomposan sangat tergantung dari macam dan jumlah bahan yang akan dikomposkan. Selain hal tersebut di dalam pengomposan harus diperhatikan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kecepatan proses pengomposan dan kualitas kompos yang dihasilkan, yaitu:

- **Aerasi:** pertukaran udara dalam tumpukan bahan yang dikomposkan harus lancar sehingga terjadi proses-proses suplai oksigen, pelapasan CO_2 , pelepasan panas, dan pemerataan kelembapan. Hal ini bisa terjadi jika pori-pori (rongga udara) di dalam tumpukan bahan kompos berkisar 30 – 35%.
- **Kelembapan:** kelembapan tumpukan bahan yang dikomposkan berkisar 50 - 70%, hal ini diperlukan untuk mendukung aktivitas mikroba. Jika kelembapan <40% menghambat laju proses pengomposan, tetapi jika kelembapan >70% akan terjadi proses pengomposan *anaerob*.
- **Unsur hara (terutama C:N):** nilai C/N bahan yang akan dikomposkan sebaiknya berkisar antara 30 – 40%. Jika nilai C/N >40 proses pengomposan akan berlangsung lebih lama tetapi jika <20 terjadi banyak kehilangan N, sebagian hilang ke udara dalam bentuk amonia dan N_2O , timbul aroma tidak sedap.

2.2.1. Pengomposan limbah sisa panen atau kotoran ternak skala kecil

Bahan: limbah sisa panen seperti jerami padi, batang jagung, alang-lang, rumput-rumputan, kotoran kambing, kotoran ayam, serasah dedaunan, dll.

Peralatan:

- Tempat/bak pengomposan, terdiri atas:
 - Bilah-bilah bambu atau kayu yang mudah didapat di sekitar lokasi, berfungsi sebagai pembatas/pagar penghalang.
 - Bilah-bilah dibentuk seperti pagar berukuran panjang x lebar x tinggi = 1 m x 1 m x 1,25 m atau lebih besar, disesuaikan dengan kebutuhan (jumlah) bahan yang akan dikomposkan tetapi tinggi dan lebar tidak boleh kurang dari 1 m.
- Ember atau gembor sebagai alat penyiraman.
- Plastik berwarna gelap untuk menjaga kelembapan
- Termometer batang

Cara pengomposan

- Penumpukan bahan kompos

Dibuat tempat pengomposan dari bilah-bilah bambu bentuk pagar berukuran (paling kecil) panjang x lebar x tinggi = 1 m x 1 m x 1,25 m atau lebih, seperti Gambar 3.



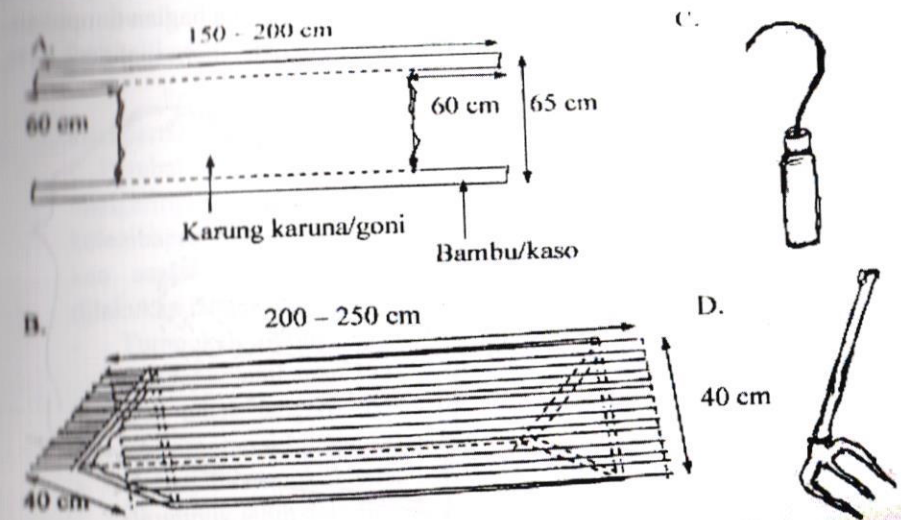
Gambar 3. Bak pengomposan yang telah ditutup plastik dan pemanenan kompos jerami

- Bahan-bahan yang akan dikomposkan (jerami, gulma, sisa tanaman, dll) dikumpulkan dan dipisahkan dari bahan yang tidak/sukar dikomposkan (seperti: tempurung kelapa, potongan bambu, potongan kayu).
- Pencacahan bahan (memotong kecil-kecil) dapat dilakukan karena dapat membantu mempercepat proses pengomposan. Bahan ditumpuk di dalam bak pengomposan lapis demi lapis, tinggi setiap lapisan 20 – 25 cm.
- Jika memakai dekomposer, inokulan dekomposer tersebut dicampur dengan air atau langsung ditabur sesuai aturan pakai dan dibagi menjadi 4 – 5 bagian.
- Di atas lapisan disiram dengan satu bagian campuran inokulan, penyiraman air dilakukan sampai kelembapan mencapai 50 – 65%.
- Penumpukan bahan yang dikomposkan secara berlapis dilaksanakan sampai tinggi tumpukan mencapai 1,25 m.
- Tumpukan ditutup dengan plastik untuk menjaga kelembapan selama proses pengomposan berlangsung.
- **Pemeliharaan tumpukan**
 - Supaya proses pengomposan berlangsung cepat, tumpukan pengomposan perlu dijaga/dipelihara dengan cara:
 - Pengamatan suhu harian.
 - Pengamatan suhu tumpukan dilakukan 2 – 3 hari sekali, hal ini diperlukan untuk mengetahui kecepatan proses pengomposan. Pengamatan suhu dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Tutup plastik dibuka seperlunya (di tempat-tempat pengamatan suhu) dan tongkat bambu/kayu ditusukkan di 3 – 5 tempat keliling tumpukan sedalam 20 – 25 cm.
- Masukkan termometer batang ke dalam lubang tusukan tersebut dan didiamkan selama 4 – 6 menit.
- Diamati suhu kompos, rata-ratakan suhu kompos dari ke 3 – 5 tempat pengamatan tersebut.
- Jika hasil rata-rata suhu tersebut $> 60^{\circ}\text{C}$, berarti proses pengomposan berjalan cepat; Jika suhu $50 - 60^{\circ}\text{C}$ proses pengomposan masih bisa dipercepat; Jika suhu $< 50^{\circ}\text{C}$ proses pengomposan berjalan lambat, hal ini dapat disebabkan: (1) aerasi tumpukan bahan yang dikomposkan tidak memadai $< 30\%$ (terlalu padat); (2) kelembapan tumpukan $\leq 50\%$ (terlalu kering); (3) kelembapan tumpukan $\geq 65\%$, dalam hal ini terjadi pengomposan secara anaerob dan timbul bau busuk; dan (4) Kompos telah masak
- Pembalikan tumpukan
Pembalikan tumpukan bahan kompos diperlukan untuk mempertahankan kecepatan pengomposan terutama jika suhu kompos $\leq 45^{\circ}\text{C}$. Pembalikan juga berfungsi untuk: (1) meratakan proses pengomposan; (2) mengeringkan bahan jika kelembapan bahan $\geq 65\%$ atau menambah kelembapan dengan penyiraman jika kelembapan $\leq 50\%$; dan (3) meningkatkan aerasi tumpukan sehingga suplai oksigen tercukupi. Pembalikan dilakukan dengan cara:
 - Lepaskan plastik penutup tumpukan dan salah satu sisi bak pengomposan dibuka.
 - Melalui sisi bak pengomposan yang terbuka, tumpukan dibongkar, dikeringanginkan sampai kelembapan 50 – 65% (bahan diperas akan keluar 3 – 10 tetes air dari tapak tangan) jika kelembapan bahan $\geq 65\%$ atau ditambah/disiram air jika kelembapan $\leq 50\%$.
 - Bahan ditumpuk kembali dengan bagian luar dipindah ke tengah tumpukan, ditutup kembali dengan penutup plastik.
- Panen kompos
 - Panen kompos dilakukan jika proses pengomposan telah selesai yaitu jika suhu tumpukan kompos (pada kelembapan 50 – 65%) selama 3 hari berturut-turut $\leq 35^{\circ}\text{C}$, tinggi tumpukan tinggal 35 – 60%
 - Tutup plastik serta tumpukan pengomposan dibongkar dan dikeringanginkan selama 1 – 3 hari sehingga kadar air $< 12\%$.
 - Kompos yang sudah jadi (matang) berwarna coklat kehitaman, suhu setara dengan suhu kamar atau 30°C , dan tidak berbau atau berbau seperti tanah.
 - Kompos kering dimasukkan ke dalam karung karuna dan dapat disimpan atau langsung dipakai untuk pupuk.

1.2.2. Pengomposan Sampah Kota dan Limbah
Bahan: sampah kota atau kotoran ternak dalam jumlah yang besar.
Peralatan:

- Tempat pengomposan berupa bangunan yang terdiri atas:
 - Tempat penurunan sampah: tempat ini untuk menurunkan sampah yang diangkut dengan truk atau alat transport lainnya
 - Tempat hasil sortasi sampah: tempat untuk pengumpulan sementara sampah organik yang *compostable* (mudah dikomposkan) dari hasil pemilahan/sortasi sampah yang siap untuk dikomposkan.
 - Tempat penumpukan (pembentukan *hip*): tempat untuk penumpukan sampah saat proses pengomposan, terlindung dari air hujan maupun air tergenang.
 - Tempat pemusnahan bahan *uncompostable* (bahan yang susah dikomposkan): tempat untuk memusnahkan bahan *uncompostable* hasil sortasi seperti potongan bambu, potongan/kotak kayu, tempurung kelapa, pelepah tanaman palm, dll.
 - Sumber air: air diperlukan untuk mempertahankan kelembapan sehingga tempat pengomposan sebaiknya dekat dengan sumber air.

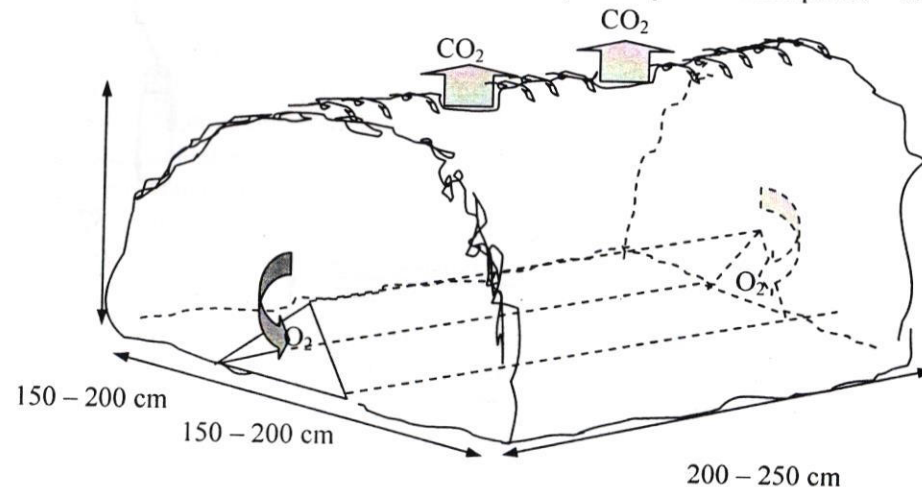


Gambar 4. Skema peralatan pengomposan sampah kota, berupa: segitiga aerasi (A), alat pengangkut sampah dari tandu karung karuna (B), gacok (C) untuk sortasi dan mengambil sampah, dan garpu untuk membalik/membongkar tumpukan (D)

- Tempat penyimpanan/gudang kompos: tempat untuk menyimpan kompos yang belum sempat digunakan/didistribusikan.
- Segitiga aerasi seperti Gambar 4
- Peralatan untuk pengangkutan sampah seperti Gambar 4.
- Selang plastik
- Termometer

Cara pengomposan

- Penentuan bahan sampah
Bahan sampah dipilih sampah yang berasal dari pasar sayur atau mengandung bahan *compostable* > 80%.
- Sortasi sampah: Sampah kota disortasi/dipisahkan antara bahan yang *compostable* seperti sisa sayuran, dedaunan, kelobot jagung, dll. dengan bahan yang *uncompostable* seperti bahan plastik, kaca, kayu, kertas aluminium, bekas baterai, dll.
- Penumpukan bahan kompos
 - Bahan kompos ditumpuk di atas segitiga aerasi dengan ukuran lebar: 1,5 – 1,75 m, panjang 2 – 2,5 m; dan tinggi 1,5 – 1,75 m seperti skema pada Gambar 5.
 - Jika memakai dekomposer, inokulan dekomposer tersebut dicampur dengan air sesuai aturan pakai dan disiramkan merata di semua bagian tumpukan.
 - Penyiraman dilakukan sampai kelembapan tumpukan mencapai 50 – 65%.



Gambar 5. Skema tumpukan (*heap*) pengomposan sampah kota, proses pengomposan akan meningkatkan suhu tumpukan sehingga aliran udara (O_2) secara otomatis masuk ke dalam tumpukan sampah melalui segitiga aerasi sehingga kelembapan dalam tumpukan merata dan pelepasan CO_2 dan panas dari dalam tumpukan lancar

■ Pemeliharaan tumpukan

Supaya proses pengomposan berlangsung cepat, tumpukan pengomposan perlu dipelihara dengan cara:

• Pengamatan suhu harian.

Pengamatan suhu tumpukan dilakukan mulai hari ke tiga dan setiap 2 – 3 hari sekali, hal ini diperlukan untuk mengetahui kecepatan proses pengomposan. Pengamatan suhu dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Tongkat bambu/kayu ditusukkan di 3 – 5 tempat di sekeliling tumpukan sedalam 20 – 25 cm.
- Masukkan termometer batang ke dalam lubang tusukan tersebut dan didiamkan selama 4 – 6 menit.
- Amati suhu kompos dan rata-ratakan suhu kompos dari ke 3 – 5 tempat pengamatan tersebut.
- Jika hasil rata-rata suhu tersebut > 60° C, berarti proses pengomposan berjalan cepat; Jika suhu < 50° C proses pengomposan berjalan lambat, hal ini dapat disebabkan: (1) aerasi tumpukan bahan yang dikomposkan tidak memadai < 30% (terlalu padat); (2) kelembapan tumpukan ≤ 50% (terlalu kering); dan (3) kelembapan tumpukan ≥ 65% (terlalu basah), dalam hal ini terjadi pengomposan secara anaerob yang disertai bau busuk.

• Pembalikan tumpukan

Pembalikan tumpukan bahan kompos diperlukan untuk mempertahankan kecepatan pengomposan terutama jika suhu kompos ≤ 45° C. Pembalikan juga berfungsi untuk: (1) meratakan proses pengomposan; (2) mengeringkan bahan jika kelembapan bahan ≥ 65% atau menambah kelembapan dengan penyiraman jika kelembapan ≤ 50%; (3). Meningkatkan aerasi tumpukan sehingga suplai oksigen tercukupi. Pembalikan dilakukan dengan cara:

- Tumpukan dibongkar, jika kelembapan bahan ≥ 65% dikeringanginkan sampai kelembapan 50 – 65% (bahan diperas akan keluar 3 – 10 tetes air dari tapak tangan). Akan tetapi jika kelembapan ≤ 50% diperlukan penyiraman sehingga kelembapan mencapai 50 – 65%.
- Bahan ditumpuk kembali di atas segitiga aerasi dengan bagian luar ditumpuk lebih dahulu sehingga berada di tengah tumpukan.
- Pekerjaan tersebut (pembalikan tumpukan) dilakukan seminggu sekali sampai proses pengomposan.

• Panen kompos

- Panen kompos dilakukan jika proses pengomposan telah selesai yaitu jika suhu tumpukan kompos (pada kelembapan 50 - 65%) selama 3 hari berturut-turut ≤ 35° C.

- Kompos yang sudah jadi (matang) berwarna coklat kehitaman, suhu setara dengan suhu kamar atau 30°C, dan tidak berbau atau berbau seperti tanah.
- Tumpukan dibongkar dan dikeringanginkan selama 2 – 4 hari sehingga kadar air < 12%.
- Kompos kering diayak dengan kawat ayakan ukuran 1 – 2 cm dan hasil ayakan dimasukkan ke dalam karung karuna yang selanjutnya dapat disimpan atau langsung dipakai untuk pupuk.

2.3. Pengomposan Tandan Kelapa Sawit Skala Besar

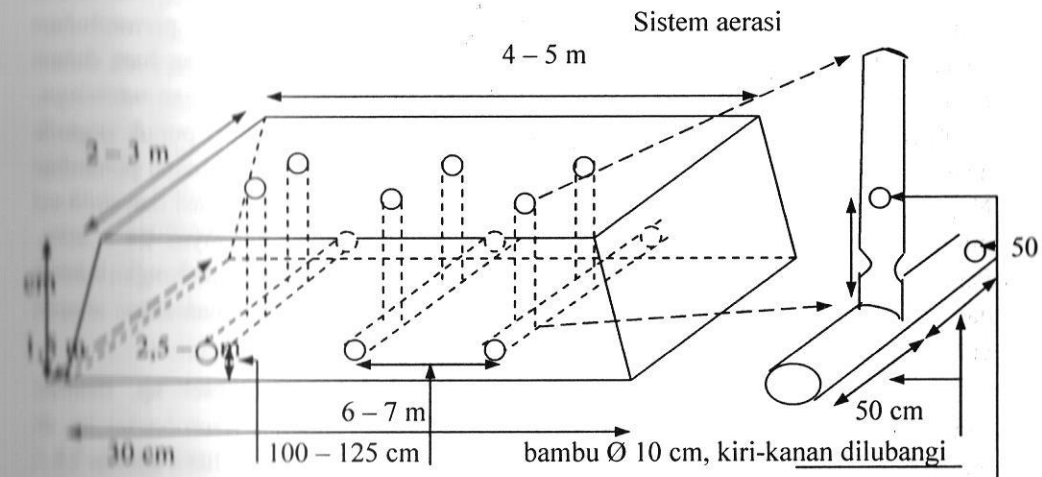
Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah limbah pabrik kelapa sawit yang jumlahnya sangat banyak. Setiap 1 ton tandan buah segar (TBS) akan dihasilkan sebanyak 220 – 230 kg TKKS.

Prinsip dan prosedur pengomposan sama seperti prosedur di atas tetapi diperlukan perlakuan khusus yaitu pencacahan. Pencacahan merupakan tahapan penting dalam pengomposan TKKS. Pencacahan dilakukan dengan menggunakan mesin pencacah yang kapasitasnya sesuai dengan volume TKKS yang dihasilkan pabrik. Mesin tersebut sebaiknya dapat memperkecil ukuran TKKS menjadi ± 5 cm. Selain memperkecil ukuran, pencacahan juga akan mengurangi kadar air TKKS, sebagian air akan menguap karena luas permukaan spesifik TKKS yang meningkat.

Inokulasi dengan bioaktivator perlu dilakukan. Hal ini disebabkan secara alami peruraian TKKS memerlukan waktu yang sangat lama yaitu 6 – 12 bulan. Agar proses pengomposan dapat berlangsung lebih cepat dapat ditambahkan bioaktivator pengomposan. Aktivator ini berbahan aktif mikroba decomposer yang mampu mendegradasi lignoselulose. Mikroba-mikroba ini akan berperan aktif dalam mempercepat proses pengomposan, yang umum digunakan adalah fungi dari jenis *Trichoderma* sp. atau mikroba lain yang mampu mensekresi enzim lignoselulase. Mikroba-mikroba ini menghasilkan enzim yang bersifat lignoselulolitik dan dapat mendegradasi senyawa lignoselulosa secara cepat.

Agar aktivator dapat bekerja dengan baik maka pemberian aktivator dalam tumpukan harus merata. Selama proses pengomposan berlangsung, kadar air 60% tetap dipertahankan karena kadar tersebut merupakan kadar yang optimal untuk pengomposan. Kadar air TKKS sebelum proses pengomposan dimulai harus diupayakan dalam kisaran tersebut. Apabila kadar air kurang, proses pengomposan berjalan lambat. Salah satu penyebab adalah karena dalam aktivitasnya mikroba membutuhkan air. Apabila kelembapan < 50%, aktivitas mikroba terhambat tetapi apabila kadar air terlalu tinggi (> 70%), oksigen yang ada di dalam TKKS hanya sedikit, sehingga proses pengomposan akan lambat dan berlangsung dalam kondisi anaerob.

TKKS yang telah diinokulasi selanjutnya ditumpuk seperti pada Gambar 3. Di antara tumpukan bahan diberi lubang-lubang aerasi yang berupa batang-batang bambu berlubang, sekat-sekat dalam batang bambu pada tiap ruasnya dihilangkan, diletakkan secara horizontal maupun vertikal dengan tataletak seperti pada skema Gambar 6.



Gambar 6. Skema penumpukan bahan pada pengomposan skala besar pada proses pengomposan bersuhu tinggi (modifikasi FAO No. 40, 1977)

Penutupan tumpukan sangat dianjurkan, penutup dari bahan plastik gelap diperlukan untuk menjaga kelembapan dan suhu bahan yang dikomposkan. Plastik dipilih yang cukup tebal, tahan panas, dan tahan sinar matahari. Selama proses pengomposan suhu bahan kompos akan meningkat dengan cepat. Suhu dapat mencapai > 70°C. Suhu tinggi ini akan berlangsung dalam waktu cukup lama, kurang lebih 2 – 3 minggu. Suhu yang tinggi juga menunjukkan bahwa proses dekomposisi sedang berlangsung intensif. Pemeliharaan tumpukan diperlukan untuk menjaga supaya proses dekomposisi tetap berlangsung secara intensif. Suhu akan menurun pada akhir proses pengomposan. Salah satu ciri kompos yang sudah matang adalah apabila suhu kompos sudah setara dengan suhu kamar.

Pembalikan dilakukan untuk menurunkan suhu dan memberikan aerasi pada kompos. Pembalikan biasanya dilakukan seminggu sekali. Proses pengomposan akan berlangsung dalam waktu 1,5 – 2 bulan. Kompos yang sudah matang mempunyai ciri-ciri:

- Warna menjadi coklat kehitaman
- Suhu stabil seperti suhu kamar < 35° C.
- TKKS mudah hancur, serat-seratnya mudah putus.
- Nilai C/N berkisar antara 20 – 25.

Kompos yang sudah matang dapat di panen dengan pengayakan ukuran 1 – 1,5 cm. Dari setiap 1 ton bahan segar dapat dihasilkan 350 – 500 kompos.

2.4. Pengkayaan Kompos

Sebagian besar hasil pengomposan memiliki kandungan nitrogen dan fosfor yang rendah serta miskin unsur hara lainnya yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu untuk meningkatkan kualitas dan kandungan hara dalam pupuk organik diperlukan teknik pengkayaan dan peningkatan kandungan nutrisinya. Salah satu usaha yang memungkinkan untuk meningkatkan kualitas pupuk organik adalah dengan pengkayaan mikroba tanah yang mempunyai peran sebagai penambat N, pelarut fosfat, penyedia K, dan dekomposer bahan organik. Inokulasi dan aplikasi mikroba meningkatkan kandungan N dalam kompos perkotaan sebanyak 24 – 30%. Penelitian sekarang ini lebih banyak dilakukan untuk memperbaiki kandungan nutrisi dan kualitas kompos melalui inokulasi konsorsium mikroba dan bahan alami seperti batuan fosfat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi *Azotobacter* sp. disertai dengan pemberian pupuk kandang dapat meningkatkan populasi *Azotobacter* sp. di dalam tanah. Dengan inokulasi *Azotobacter* sp. dapat meningkatkan hasil sekitar 15 – 60% (Rao, 1982) dan dapat mengurangi pemakaian pupuk buatan sampai 30%. Inokulasi *Azotobacter* sp. akan lebih meningkatkan hasil tanaman apabila dibarengi dengan pemberian bahan organik seperti kompos.

Pada saat ini telah banyak dikembangkan teknologi alternatif untuk mendukung peningkatan produktivitas lahan dan tanaman. Salah satu teknologi alternatif yang potensial adalah pemanfaatan kompos bioaktif. Kompos bioaktif merupakan kompos hasil proses penguraian bahan organik yang menggunakan agen hayati dekomposer seperti *Trichoderma* sp. yang sekaligus berperan sebagai antagonis patogen, yang diperkaya dengan mikroba bermanfaat dan bahan alami seperti batuan fosfat. Sehingga pupuk organik yang telah diperkaya mempunyai fungsi dan peranan yang kaya juga dalam mendukung produktivitas lahan dan tanaman.

Semakin maraknya gerakan pertanian organik, maka prospek pengembangan pupuk organik yang diperkaya dengan mikroba bermanfaat dan bahan alami atau disebut sebagai produk kompos bioaktif akan semakin cerah di masa sekarang dan masa yang akan datang.

3.4.1. Bahan dan peralatan

3.4.1.1. Bahan untuk pengkayaan pupuk organik dengan mikroba dan bahan alami

- Bahan pengkaya meliputi inokulan konsorsium mikroba tanah bermanfaat (penambat N₂, pelarut P dan K, penghasil zat pemacu produksi tanaman dan anti patogen) yang telah diteliti dan diseleksi di Balai Penelitian Tanah, MOL (mikroorganisme lokal) yang dibuat petani dan bahan alami (batuan fosfat).
- Pupuk organik (kompos) yang sudah jadi
- Bahan penunjang: alkohol, plastik/karung untuk wadah/bungkus pupuk organik isi 25 kg

3.4.1.2. Peralatan untuk pengkayaan pupuk organik dengan mikroba dan bahan alami

- Peralatan: pipet, gelas ukur, sprayer kecil, alat angkut kompos, gayung dan alat untuk penyiraman (ember/gembor).

3.4.2. Prosedur

3.4.2.1. Penyiapan bahan

- Pupuk organik yang akan diperkaya dengan mikroba dan bahan alami disiapkan di dalam karung isi 25 kg atau sesuai kebutuhan.
- Mikroba yang akan dipakai adalah inokulan konsorsium mikroba hasil penelitian Balai Penelitian Tanah dan mikroorganisme lokal (MOL) petani.
 - Inokulan konsorsium mikroba tanah bermanfaat yang telah diteliti dan diseleksi di Balai Penelitian Tanah yang mempunyai fungsi sebagai penambat N₂ bebas, pelarut P dan K, pemacu tumbuh tanaman dan anti patogen dalam media cair disiapkan sebagai bahan bioaktif yang akan diinokulasikan ke dalam pupuk organik.
 - Mikroorganisme lokal (MOL) petani sebagai pembanding disiapkan untuk diberikan ke dalam pupuk organik.
- Batuan fosfat disiapkan sebagai bahan alami yang akan ditambahkan ke dalam pupuk organik

3.4.2.2. Pengkayaan pupuk organik dengan mikroba dan bahan alami

- Inokulan konsorsium mikroba tanah bermanfaat dalam media cair (yang berisi mikroba penambat N₂ bebas, pelarut P dan K, pemacu tumbuh tanaman dan anti patogen) dimasukkan secara hati-hati ke dalam pupuk organik dengan perbandingan 1 : 5 antara inokulan dan pupuk organik (v/w).

- Kemudian Batuan fosfat sebanyak 10% dimasukan ke dalam pupuk organik. Kemudian aduk secara merata.
- Mikroorganisme lokal petani dimasukkan ke dalam kompos dengan perbandingan 1 : 5 antara MOL dan pupuk organik (v/w). Kemudian batuan fosfat sebanyak 10% dimasukan ke dalam pupuk organik dan diaduk secara merata.
 - Setelah pemberian mikroba dan batuan fosfat kemudian pupuk organik diinkubasi selama ± 7 hari.
 - Setelah diinkubasi pupuk organik yang telah diperkaya mikroba terseleksi + batuan fosfat dan diperkaya MOL + batuan fosfat dapat dimanfaatkan di lapangan.

III. TEKNOLOGI MIKROBA PENGURAI BAHAN ORGANIK

3.1. Teknologi Mikroba Selulolitik dan Aplikasinya

Mikroba selulolitik bersama dekomposer (pengurai atau perombak) lainnya merupakan bagian pelaku siklus karbon di bumi. Dekomposer di tanah menguraikan senyawa-senyawa kompleks (berbobot molekul besar, tidak larut) seperti limbah pertanian sebagai energi dan sumber karbon bagi pembentukan sel-sel baru untuk kelangsungan hidupnya. Energi yang dibentuk di dalam sel mikroba melalui oksidasi senyawa organik dan sebagian besar produk akhir berupa karbon dioksida (CO_2) dibebaskan kembali ke atmosfer.

Dekomposer yang terdiri atas mikoba selulolitik (perombak selulosa), ligninolitik (perombak lignin), pektinolitik (perombak pektin), proteolitik (perombak protein) mampu mengurai senyawa kompleks dengan menghasilkan enzim yang bersifat ekstraselular (dikeluarkan sel mikroba ke lingkungan) atau bersifat masih menempel sebagian pada protein dinding sel. Dengan kemampuannya ini, mikroba selulolitik telah dimanfaatkan dalam berbagai industri seperti industri makanan, industri bioetanol, biogas, dan dalam industri kertas digunakan sebagai pemutih. Di bidang lingkungan dan pertanian, mikroba selulolitik atau ligniniselulolitik digunakan sebagai agen dekomposer untuk pengelolaan sampah kota dan limbah pertanian menjadi kompos dan sebagai agen bioremediasi (pemulihan lingkungan tercemar secara biologi) lingkungan tanah tercemar senyawa hidrokarbon linear maupun aromatik.

Dalam sistem pertanian organik atau semiorganik memerlukan *input* bahan organik secara teratur dan dalam jumlah tertentu. Namun pemberian bahan organik yang belum dikomposkan atau setengah matang serta dibenamkan ke dalam tanah berbarengan dengan saat tanam menimbulkan berbagai masalah yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen seperti berkembangnya gulma, berkembangnya penyakit tanaman, serta dekomposisi lanjut bahan organik. Dengan demikian diperlukan kompos tersedia dengan cepat untuk setiap menghadapi musim tanam. Pemanfaatan agen mikroba selulolitik untuk pengomposan limbah pertanian secara terkendali dapat memenuhi kebutuhan kompos dengan cepat pada sistem pertanian organik mengingat sebagian besar komponen dasar bahan organik limbah pertanian yang terbesar adalah selulosa.

3.1.1. Mikroba selulolitik dalam taksonomi

Berdasarkan analisis pohon filogeni mikroba perombak selulosa tersebar luas di antara genus dalam domain *Bacteria* dan di antara kelompok fungi dalam domain *Eucarya*, namun belum teridentifikasi dari domain *Archaea*. Dalam *eubacteria*, ordo yang memiliki kemampuan selulolitik terkonsentrasi pada ordo aerobik *Actinomycetales* (phylum *Actinobacteria*) dan ordo anaerobik (tidak

membutuhkan oksigen untuk pertumbuhannya) *Clostridiales* (phylum *Firmicutes*). Fungi selulolitik terdistribusi melintasi seluruh kingdom dari fungi primitif, Chytridomycetes seperti protista sampai Basidiomycetes yang merupakan fungi tingkat tinggi.

Fungi merupakan agen perombak bahan organik secara umum dan substrat selulosa secara khusus. Sejumlah spesies Chytridomycetes anaerobik dari kelompok fungi paling primitif dikenal sebagai perombak selulosa dalam saluran pencernaan ruminansia, yang merupakan anggota ordo Neocallimastigales dan diklasifikasikan berdasarkan morfologi zoospora motil dan thalus vegetatif. Genus fungi tersebut adalah *Noeocallimastix*, *Piromyces*, *Caecomyces*, *Orpimomyces*, dan *Anaeromyces*.

Kemampuan selulolitik juga ditunjukkan subdivisi lain yaitu fungi aerob (membutuhkan oksigen untuk pertumbuhannya), dari 700 spesies hanya anggota tertentu dari genus *Mucor* yang memiliki aktivitas selulolitik (paling dikenal sebagai perombak substrat sederhana yang dapat larut). Fungi selulolitik, sebaliknya lebih banyak dan beragam pada subdivisi Ascomycetes, Basidiomycetes, dan Deuteromycetes (masing-masing lebih dari 1.500 spesies) yang terdiri atas sejumlah besar spesies-spesies selulolitik. Anggota genus yang banyak dipelajari berkaitan dengan enzim selulolitik dan kemampuan merombak kayu: *Bulgaria*, *Chaetomium*, dan *Helotium* (Ascomycetes); *Coriolus*, *Phanerochaete*, *Poria*, *Schizophyllum* dan *Serpula* (Basidiomycetes); dan *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Myrothecium*, *Paelomyces*, *Penicillium*, dan *Trichoderma* (Deuteromycetes).

Secara fisiologi, bakteri selulolitik terdiri atas beberapa kelompok fisiologi berbeda (i) anaerob fermentatif, dengan tipikal Gram-positif (*Clostridium*, *Ruminococcus*, dan *Caldicellulosiruptor*) tetapi beberapa adalah gram negatif. Secara filogenetik sebagian besar berhubungan dengan susunan *Clostridium* (*Butyrivibrio* dan *Acetivibrio*) tetapi beberapa tidak mirip (*Fibrobacter*); (ii) bakteri aerobik Gram-positif (*Cellulomonas* dan *Thermofobia*); dan (iii) bakteri lancur aerobik (*Cytophaga* dan *Sporocytophaga*). Umumnya hanya beberapa spesies dalam masing-masing genus yang disebutkan di atas merupakan bakteri selulolitik. Distribusi kemampuan selulolitik di antara organisme berbeda dalam kaitan oksigen, suhu, dan toleransi garam.

Spesies yang paling sering dipelajari produksi selulasenya adalah fungi busuk putih *Trichoderma reesei* dan *Trichoderma viridae*. Mikroba penghasil enzim selulase dapat diisolasi dengan mudah dari potongan kayu yang membusuk, atau dari usus rayap bila spesies bakteri yang diinginkan. Fungi lain yang sering digunakan adalah *Fusarium solani*, *Aspergillus niger*, *Penicillium funicolsum*, dan *Cellulomonas* sp. Spesies-spesies bakteri *Clostridium thermocellum* dan *Clostridium thermosaccharolyticum* yang mewakili sebagai calon penghasil selulase yang bersifat termofilik (sedikit masalah kontaminasi karena laju pertumbuhan yang lebih cepat pada suhu tinggi), anaerob, etanogenik (konversi selulosa menjadi etanol melalui

glukosa dengan kultur anaerobik) (Lynd et al., 2002).

Pada fungi dikenal istilah fungi busuk coklat dan fungi busuk putih, disebut fungi busuk coklat karena dapat menguraikan selulosa dan hemiselulosa, menyisakan lignin serta senyawa fenolik yang berwarna coklat pada kayu. Sebaliknya fungi busuk putih dapat menguraikan semua komponen kayu termasuk lignin tetapi menyisakan sejumlah besar akumulasi selulosa yang berwarna putih pada kayu. Fungi busuk putih umumnya adalah dari kelompok basidiomisetes.

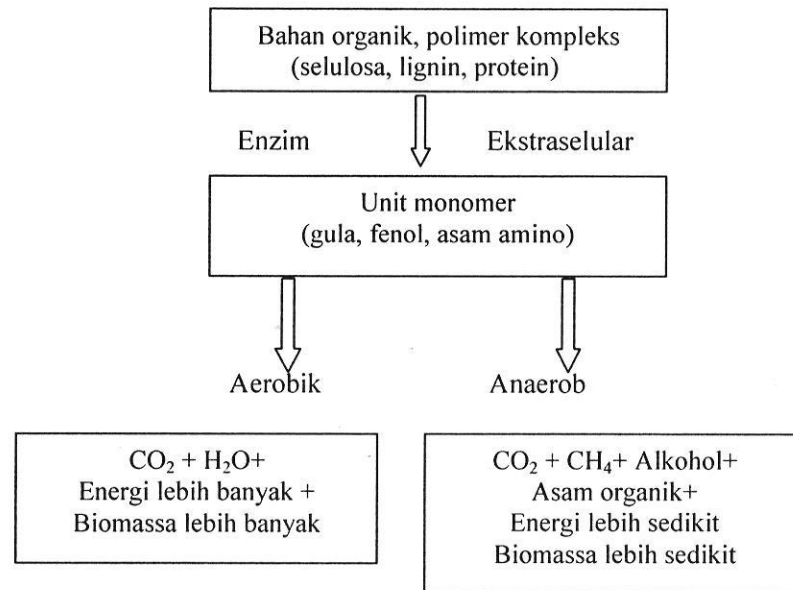
Di antara mikroba selulolitik, fungi merupakan agen dekomposer paling umum dan menunjukkan aktivitas yang lebih nyata.

3.1.3. Peranan mikroba selulolitik

Aktivitas dasar mikroba tanah seperti organisme hidup lainnya adalah keberlangsungan hidup melalui reproduksi. Mikroba tanah menggunakan komponen limbah organik sebagai substrat untuk energi dan sumber karbon dalam sintesis sel-sel baru. Energi dibentuk dalam sel-sel mikroba melalui oksidasi senyawa organik. Produk akhir utama oksidasi senyawa organik adalah karbon dioksida (CO_2), yang dibebaskan kembali ke dalam atmosfer.

Di dalam tipikal ekosistem yang menguraikan selulosa, berbagai bakteri dan fungi selulolitik bekerja seperti sebuah konser dengan mikroba terkait penguraian substrat dalam hal ini bahan organik berselulosa yang tidak dapat larut menjadi gula yang bersifat dapat larut, terutama selubiosa dan glukosa. Gula sederhana ini selanjutnya diangkut melintasi membran sel mikroba dan digunakan sebagai nutrisi oleh mikroba. Untuk mengkatalisis penguraian polimer selulosa tersebut, mikroba menghasilkan berbagai enzim ekstraselular-diekskresikan sel mikroba ke dalam lingkungan dalam keadaan bebas atau berasosiasi dengan sel, yang dikenal dengan selulase.

Tiga komponen selulase yaitu endo- β -1,4-glukanase atau 1,4- β -D-glukan-4-glucanohidrolase (EC 3.2.1.4), ekso- β -1,4-glukonase (EC 3.2.9.1 atau selobiohidrolase), dan β -1,4-glukosidase (EC 3.2.1.21) mengurai selulosa secara sinergis. Endoglukanase akan memulai penguraian pada daerah amorf (dapat larut) secara acak sehingga membentuk rantai yang terbuka untuk aktivitas selobiohidrolase, kemudian selobiohidrolase memecah molekul selobiose dari ujung rantai. Selobiosa yang terbentuk selanjutnya dihidrolisis oleh β -glukosidase menjadi glukosa.



Gambar 7. Reaksi umum proses perombakan bahan organik oleh mikroba

Proses mikroba selulolitik juga mikroba penguraian bahan organik lainnya dalam mendekomposisi bahan organik bervariasi dapat secara aerob (butuh oksigen) sampai anaerob (tidak butuh oksigen) dan mesofilik sampai termofilik tergantung pada sifat mikroba dan faktor lingkungan. Proses peruraian bahan organik oleh mikroba dekomposer dapat dilihat pada Gambar 7. Lintasan dekomposisi aerob merupakan proses yang paling penting pada lingkungan tanah terutama bila dikaitkan dengan kesuburan dan kesehatan tanah. Kondisi aerob dan termofilik menyediakan lingkungan bagi keberlangsungan proses dekomposisi yang cepat dan sempurna.

3.1.3. Bahan organik limbah pertanian berselulosa

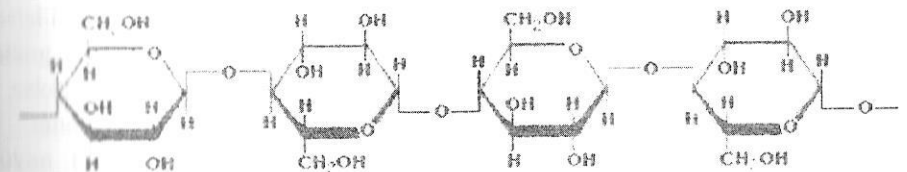
Pada kegiatan pertanian, limbah pertanian umumnya adalah sisa-sisa panen sebagai brangkas. Komposisi bahan organik tanaman sangat bervariasi dan umumnya terdiri atas 60-70% karbohidrat (polisakarida), 15-20% lignin, dan 15% senyawa lain termasuk protein, asam nukleat, lemak, lilin, dan pigmen. Pada Tabel 6 ditampilkan komposisi yang mewakili beberapa limbah pertanian. Sebagian besar limbah hasil pertanian mengandung selulosa sebagai komponen polimer polisakarida yang utama, yang berarti selulosa merupakan polimer karbohidrat atau polisakarida paling melimpah di bumi dan dapat terbarukan.

Tabel 6. Komposisi beberapa limbah pertanian (g kg^{-1} berat kering massa)

Komponen	Jagung	Kedelai	Gandum
Komponen dapat larut	293	557	288
Hemiselulosa	268	90	184
Selulosa	284	222	361
Lignin	56	119	141
Abu	93	64	84
Nitrogen	10	22	9

Sumber: Broder dan Wagner 1988 dalam Wagner dan Wolf 1995

Selulosa merupakan polimer karbohidrat atau polisakarida yang memiliki rumus $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$. Selulosa memiliki ikatan β -1-4 glukosida pada residu glukosilnya membentuk rantai polimer linear glukana dengan struktur rantai yang seragam (Gambar 8). Struktur selulosa berikatan dengan hemiselulosa serta polisakarida struktural lain dan disegel oleh segel lignin sehingga memberikan struktur kaku pada dinding sel tanaman. Lignin merupakan suatu matrik poliaromatik tiga dimensi yang membentuk segel di sekitar microfibril selulosa dan berikatan dengan hemiselulosa. Segel lignin ini mencegah masuknya enzim dan asam mencapai daerah polimer selulosa. Di samping karena berikatan dengan komponen karbohidrat lain yang menyebabkan selulosa sulit dihidrolisis tetapi juga karena pola ikatan antar molekul selulosa berbentuk struktur kristalin.



Gambar 8. Struktur selulosa

Tingkat kesulitan limbah pertanian berlignoselulosa diurai oleh mikroba dapat ditentukan dari nilai rasio C/N. C adalah karbon yang merupakan kerangka dasar karbohidrat kompleks limbah pertanian. Beberapa nilai rasio C/N limbah pertanian organik tanaman dan ternak sebagai pembanding tertera pada Tabel 7. Semakin tinggi nilai rasio C/N bahan organik semakin sulit atau lama proses perombakannya secara alami oleh mikroba.

Rasio C/N bahan organik bervariasi dari 4:1 (C rendah, N tinggi) untuk bakteri, 300:1 sampai 600:1 untuk bahan berkayu. Rasio C/N bahan organik tanah (*soil organic matter* = NOM) pada tanah pertanian rata-rata 10:1. Rasio C/N bahan organik tanah menyediakan petunjuk tentang komunitas mikroba yang menghuni tanah. Rasio tinggi

cenderung menyokong lebih banyak fungi daripada bakteri. Pool bahan organik yang labil dengan rasio C/N rendah berimplikasi pada SOM yang meliputi proporsi mikroba tinggi.

Tabel 7. Rasio karbon-nitrogen beberapa limbah organik pertanian

Bahan	Rasio C/N
Jerami padi	80 - 130
Jerami gandum	80 - 130
Daun dan batang jagung	50 - 60
Batang kapas	70
Limbah tebu	110 - 120
Gulma	13
Bakung air	18
Daun-daun jatuh dari pohon	40 - 80
Potongan rumput	20
Kotoran sapi	19
Kotoran ayam	6
Kotoran kambing	23
Kotoran kuda	20
Kotoran manusia	6 - 10
Lumpur sampah	6
Urin	1
Bagian atas tanaman kentang	27
Kubis	12
Bawang	15
lada	15
Wortel	19
Limbah buah-buahan	35
Serbuk gergaji	208

Ketika mikroba tanah menguraikan senyawa organik, sebagian besar karbon dilepaskan sebagai CO_2 atau digunakan untuk membangun biomassa mikroba. Namun, sebagian kecil karbon berubah secara biokimia dan tetap ada di dalam tanah sebagai bahan organik tanah (SOM) yang terdiri atas zat humat (istilah umum disebut humus yang terdiri atas asam humat, asam fulvat, dan humin) dan nonhumat (asam-asam amino, karbohidrat sederhana, lemak, lilin, resin, asam-asam organik). Kadar dan kualitas SOM menentukan sifat-sifat biologi, kimia, dan fisik pada tanah.

Pengaruh menguntungkan dari SOM terhadap sifat biologi tanah adalah menyediakan sumber karbon dan energi untuk menyokong aktivitas yang besar dan beragam dari populasi mikroba seperti mikroba penambat N_2 dari udara, pelarut

fosfat, penghasil hormon tumbuh, penghasil senyawa anti hama dan penyakit, penetral atau pengurai polutan dalam tanah, dan lain-lain.

Beberapa pengaruh baik yang diberikan SOM terhadap sifat-sifat kimia tanah adalah meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, penyangga terhadap perubahan pH, menyediakan suplai nutrisi yang dilepaskan perlahan-lahan dari nutrisi yang terikat secara organik seperti nitrogen, fosfor, dan sulfur. Sifat-sifat kimia lain yang diberikan SOM bagi tanah adalah meningkatkan pengkelatan dan ketersediaan unsur-unsur mikro bagi tanaman. Mempercepat pelapukan mineral dan membantu pelarutan nutrisi tanaman (seperti fosfat) dari mineral tidak larut. Memberikan kapasitas penyerapan (adsorpsi) yang tinggi dari senyawa-senyawa organik dan selanjutnya mengurangi senyawa-senyawa xenobiotik (sintetik asing dan bahan terhadap proses degradasi atau dekomposisi) beracun.

Terhadap sifat-sifat fisik tanah, SOM berkontribusi pada perbaikan struktur tanah dan agregasi, menurunkan kepadatan (*bulk density*) dan selanjutnya meningkatkan presentase ruang pori tanah, meningkatkan kapasitas dan kekuatan pegang air, meningkatkan penyerapan panas yang disebabkan warna gelap pada awal musim kemarau dimana tanah biasanya memegang air lebih banyak sehingga membutuhkan lebih banyak energi panas.

Pemberian bahan organik yang belum dikomposkan atau kompos yang belum matang dengan ditanamkan ke dalam tanah saat penanaman menimbulkan beberapa masalah yang dapat menghambat pertumbuhan dan menurunkan hasil tanaman seperti berkembangnya gulma, berkembangnya penyakit tanaman, dekomposisi lanjut. Dekomposisi bahan organik atau dekomposisi lanjut dari kompos tidak matang ke dalam tanah dapat menyebabkan kondisi anaerob (ketiadaan gas oksigen) sekitar perakaran karena biomassa mikroba menggunakan oksigen dalam pori-pori tanah untuk mengurai bahan organik. Kondisi anaerob menyebabkan pembentukan hidrogen sulfida (H_2S) dan nitrit (NO_2) yang dapat mengganggu pertumbuhan akar. Masalah lain dari penggunaan kompos tidak matang ke dalam tanah prevalensi nilai rasio C/N yang tinggi atau lebih besar dari 25:1. Kompos tidak matang dengan C/N rasio tinggi dapat menginduksi kekurangan N pada tanaman karena mikroba memanfaatkan N tanah sehingga defisit. Masalah lain termasuk fitotoksin yang merupakan produk samping dekomposisi lanjut seperti senyawa-senyawa asetat dan fenol. Senyawa-senyawa tersebut terutama dapat menekan perkecambahan benih dan menghambat pertumbuhan akar serta menekan hasil panen (Butler *et al.*, 2001).

Berkaitan dengan hal tersebut, bahwa kegiatan pengomposan merupakan kegiatan yang tidak bisa lepas dari kegiatan pertanian organik atau semiorganik. Ketersediaan kompos yang terus-menerus dalam jumlah besar dan tersedia dengan cepat diperlukan untuk menghadapi musim tanam. Pemanfaatan mikroba selulolitik

sebagai agen dekomposer dapat memenuhi kebutuhan kompos dalam jumlah besar dan tersedia dalam waktu cepat mengingat sebagian besar dari komponen polimer bahan organik limbah pertanian adalah selulosa. Dalam bagian selanjutnya akan dijelaskan sumber-sumber untuk mengisolasi mikroba selulolitik, cara mengisolasi dan menseleksinya.

3.1.4. Isolasi mikroba selulolitik

Mikroba selulolitik dapat diisolasi dan digunakan sebagai inokulan untuk mempercepat proses pengomposan. Kelompok berbeda mikroba seperti fungi, bakteri dan aktinomisetes yang memiliki kemampuan merombak selulosa dapat diisolasi dari substrat alami (kompos, sisa-sisa tanaman di pekarangan, tanah, dan serasah) atau dengan teknik pengkayaan pada media yang sesuai. Kedua teknik tersebut telah dijelaskan dalam Project Field Document No.15. A manual of Rural composting.

3.1.4.1. Isolasi mikroba selulolitik dari substrat alami

Buat pengenceran serial substrat alami 10^{-1} , 2×10^{-2} , 10^{-2} , 2×10^{-3} , dan 10^{-3} , lalu inokulasikan 1 ml dari masing-masing pengenceran ke dalam tabung yang berisi 9-10 ml media dubois. Sisipkan kertas filter steril ujung atasnya panjang pada tutup tabung. Ujung bawah kertas filter tercelup ke dalam cairan media. Tabung-tabung diinkubasi pada suhu ruang dan amati secara periodik terbentuknya area bernoda hitam atau gelap atau dekomposisi pada kertas filter. Ambil dan maserasi kertas filter yang telah terbentuk area dekomposisi dalam sedikit air steril. Inokulasikan larutan pada media cellulose-peptone agar dan *Rose Bengal Agar* dengan teknik pencucian serial. Inkubasi media pada suhu ruang dan bila tumbuh koloni mikroba, isolasi koloni menjadi biakan murni untuk pengujian selanjutnya.

3.1.4.2. Teknik pengkayaan

Siapkan pelet selulosa dari selulosa yang menempel pada butir-butir gelas. Pelet kemudian dikubur dalam tanah yang disaring dalam kantong plastik atau secara langsung ke dalam material substrat alami seperti jerami padi atau gandum yang dipotong-potong dengan panjang 2-5 cm. Buat kelembapannya menjadi 50% dari kapasitas pegang air material yang digunakan lalu inkubasi pada suhu ruang. Setelah masa inkubasi kira-kira 1 bulan, ambil pelet dari tanah atau jerami lalu lakukan isolasi awal pada medium cellulose-peptone agar dan *Rose Bengal Agar*. Biakan murni dari satu koloni tunggal selanjutnya diuji aktivitas selulolitiknya.

Isolasi fungi, bakteri, dan aktinomisetes dapat juga dilakukan dengan teknik pengkayaan menggunakan media yang sesuai, yaitu media Hans untuk isolasi bakteri, media Asparagine untuk fungi, dan media Kenknight untuk aktinomisetes.

Sampel-sampel diinokulasikan ke dalam masing-masing media yang telah disisipi strip-strip kertas filter untuk masing-masing kelompok mikroba. Setelah 10 hari inkubasi pada suhu ruang, kertas filter dan beberapa ml media cair ditransfer media cair segar. Setelah transfer berulang seperti yang telah disebutkan (4-5 kali), biakan akan menjadi cukup diperkaya dan siap untuk dilakukan isolasi selanjutnya pada media agar cawan yang sesuai.

3.1.4.3. Isolasi mikroba selulolitik termofilik

Untuk mengisolasi mikroba dari sampel-sampel termofilik dikumpulkan dari tumpukan kompos selama tahap termofilik dan inkubasi pada suhu berkisar 45° - 60°C selama 2 - 3 hari; sampel kemudian diplating dengan cara yang sama. Inkubasi media cawan pada suhu 40° dan 55°C , diamati adanya pertumbuhan koloni selama waktu inkubasi. Koloni tunggal diisolasi dan diremajakan pada media penyimpanan, setelah diinkubasi biakan disimpan atau dipelihara pada suhu optimum masing-masing mikroba.

3.1.4.4. Isolasi mikroba selulolitik dengan media umum

Isolasi mikroba selulolitik juga dapat diisolasi menggunakan media umum masing-masing untuk kelompok fungi, bakteri, dan aktinomiset yang kemudian diseleksi pada medium yang mengandung selulosa.

3.1.4.4.1. Fungi

Contoh tanah 5 g dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100 ml mengandung 45 ml air agar (*water agar* 0,15%). Kocok pada mesin pengocok selama 30 menit. Suspensi tanah diencerkan sampai pengenceran 10^{-4} dengan akuades steril. Ambil 0,1 ml suspensi tanah dari pengenceran 10^{-2} , 10^{-3} , 2×10^{-4} , dan 10^{-4} lalu diinokulasikan pada medium agar cawan dan sebar dengan *spreader*. Inkubasi medium yang telah diinokulasi pada suhu ruang selama 2 - 5 hari. Untuk contoh serasah, serasah dipotong-potong menjadi potongan kecil (3x1 cm, 0,2 g). Masukkan ke dalam 50 ml tabung *corning*. Tambahkan 2 ml *glass beads* steril dan tambahkan 5 ml air steril ke dalam tabung. Kocok dengan vortex selama 3 menit. Saring dengan saringan *stainless steel* steril (0,3 mm). Tambahkan 5 ml air steril ke dalamnya dan kocok dengan tangan, campur suspensi awal sebelum diencerkan (1/50), selanjutnya diencerkan menjadi 1/500 dan 1/5.000. Masing-masing pengenceran diambil 0,1 ml lalu diinokulasikan ke dalam medium lalu tetesan suspensi pada medium disebar menggunakan batang penyebar. Media diinkubasi pada suhu ruang selama 2-5 hari.

3.1.4.4.2. Fungi (Basidiomisetes)

Metode yang dijelaskan di sini terutama isolasi fungi saprobik (pengurai kayu dan fungi non-simbiotik lainnya). Fungi ini menggunakan nutrisinya dari bahan organik mati terutama selulosa dan lignin. Miselium fungi menghasilkan sejumlah besar enzim yang dikeluarkan ke dalam substrat. Sebagian besar *polypores* (Aphyllphorales) dan sejumlah besar Agaricales masuk dalam kelompok fungi ini.

Ada dua metode isolasi basidiomisetes yaitu dari spora dan dari tubuh buah.

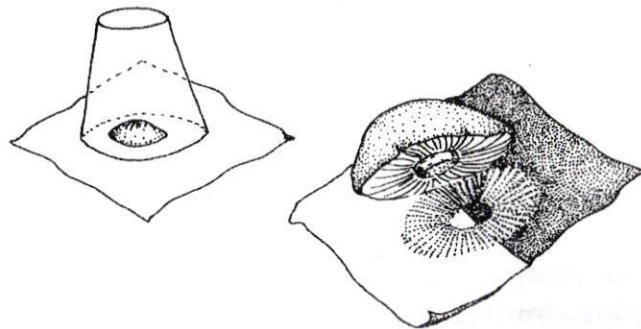
3.1.4.4.3. Spora

Tetesan spora pada cawan Petri

Sepotong kecil *hymenium* (atau seluruh cap bila tubuh buah kecil) ditempel dengan vaselin pada tutup cawan petri. Spora akan jatuh pada medium agar dan berkecambah membentuk hifa. Angkat *cap* setelah beberapa jam. Kelemahan metode ini bila *hymenium* belum matang tidak menghasilkan spora.

Cetakan Spora pada kertas

Spora diperoleh dari tubuh buah dalam bentuk *spore print*. *Pileus* diletakkan pada selembar kertas dengan *hymenium* (lapisan yang menghasilkan spora) menghadap lapisan kertas. Alternatif lain *slide glass* atau aluminium foil dapat digunakan. Spora akan jatuh pada kertas setelah beberapa jam membentuk pola dengan karakteristik *gill* (atau spora). Kertas kemudian dilipat disimpan dalam amplop dan disimpan dalam refrigerator. Dengan cara ini spora bisa tahan beberapa minggu atau bulan. Kultur baru dapat dihasilkan dengan mengambil beberapa spora menggunakan jarum atau skapel lalu diinokulasikan ke medium cawan petri. Spora akan bergerminasi dalam medium.



Gambar 9. Pembuatan cetakan basidiospora pada kertas

Substrat terinfeksi

Kayu yang membusuk merupakan sumber mikroba selulolitik dan ligninolitik kaya berbagai Basidiomisetes (busuk putih atau busuk coklat). Selain dari tubuh buah, Basidiomisetes dapat diisolasi secara selektif dari kayu dengan penambahan benomyl 1 ppm dalam medium (2% malt-ekstrak agar). Spora Ascomycetes dan hypomycetes dapat diambil menggunakan jarum kaca lalu digores ke medium yang sama tanpa penambahan benomyl.

Spora dari serasah dengan metode isolasi penyaring partikel (particle filtration method)

Metode isolasi penyaring partikel umumnya dilakukan untuk mengisolasi fungi dari contoh serasah daun. Metode ini digunakan untuk menghilangkan spora kontaminan dan spora yang tidak aktif dari permukaan substrat. Metode ini juga dapat untuk mengisolasi Basidiomycetes dan fungi lain yang tumbuh lambat. Pada metode ini digunakan penyaring partikel susun empat dengan ukuran saringan (*mesh*) 800 μ m, 250 μ m, 150 μ m, dan 75 μ m.

Contoh (daun, ranting, serasah) dihancurkan dengan *blender* selama 3-5 menit hingga berbentuk remah/partikel. Partikel sampel selanjutnya dimasukkan dalam penyaring partikel kemudian dicuci di bawah air mengalir selama ± 30 menit kemudian bilas dengan akuades steril. Angkat partikel sampel dari saringan berukuran 150 μ m dan 75 μ m, letakkan pada kertas saring, kemudian kering-anginkan pada suhu ruang di dalam laminar. Setelah kering, dengan menggunakan pinset steril secara aseptik letakkan butiran partikel di atas medium *Rose Bengal* atau *Alkali Lignin*. Atur kerapatan dan jarak tanam antar butiran partikel $\pm 5 \times 5$ mm. Inkubasi kultur pada suhu ruang selama 3--7 hari. Pilih dan transfer isolat fungi yang tumbuh pada media agar PDA. (Joint Research Project on Taxonomic and Ecological Studies of Fungi and Actinomycetes in Indonesia between Indonesia and Japan, 2006). Fungi yang diisolasi menggunakan medium alkali lignin merupakan fungi ligninolitik, apabila selanjutnya terseleksi pada medium selulolitik maka fungi tersebut merupakan fungi ligniniselulolitik.

3.1.4.4.4. Tubuh buah

Tubuh buah yang digunakan harus bebas kontaminasi, yaitu tanah. Lebih tepat memotong bagian yang bersih (digunakan untuk dikulturkan) dengan pisau dan membungkusnya secara terpisah. Daging tubuh buah sebaiknya homogen, lubang kecil menunjukkan adanya belatung. Tubuh seperti ini tidak bisa digunakan untuk kultivasi karena serangga membawa kontaminan. Bila mungkin, tubuh buah lebih baik disobek daripada dipotong (pisau dapat menyebarkan kontaminasi permukaan sepanjang area yang dipotong). Potongan kecil dari bagian dalam tubuh buah (bagian *gill* yang berhubungan dengan batang) dipotong atau disobek menggunakan pinset. Selanjutnya potongan tubuh buah ditumbuhkan pada media cawan Petri.



Gambar 10. Pemotongan tubuh buah dan pengambilan bagian kecil jaringan tubuh buah secara aseptik

Sterilisasi permukaan

Sterilisasi jaringan tubuh buah diperlukan untuk mengurangi kontamin permukaan. Sterilisasi permukaan dapat dicapai dengan H_2O_2 (5-10%), dengan pemutih (Sodium hypochlorite 5%) atau dengan alkohol. Potongan tubuh buah dicelup ke dalam desinfektan tersebut beberapa detik (untuk tubuh buah yang lunak) sampai beberapa menit (untuk *polypores* yang keras).

3.1.4.5. Media

Sebagian besar fungi busuk kayu dan basidiomisetes saprob (yaitu *polypores* tetapi juga banyak dari Agaricales) dapat dikulturkan pada media standar seperti Malt agar dan PDA. Antibiotik dapat ditambahkan ke dalam media untuk mencegah pertumbuhan bakteri. Antibiotik yang bisa digunakan diantaranya penisilin 50 ppm, streptomisin 50 ppm, dan kloramfenicol 300-500 ppm. Antibiotik dilarutkan dengan ethanol 95% dan ditambahkan ke dalam media setelah disterilkan dengan autoklaf. Sumber utama kontaminasi pada umumnya fungi dari tingkat rendah seperti *Penicillium* dan *Trichoderma*. Pertumbuhan kedua fungi tersebut dapat dihambat dengan menambahkan benomyl 2 mg (Benlate) ke dalam medium.

3.1.4.5.1. Bakteri

Contoh tanah 5 g dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100 ml mengandung 45 ml air agar (*water agar* 0,15%). Kocok pada mesin pengocok selama 30 menit. Suspensi tanah diencerkan sampai pengenceran 10^{-6} dengan akuades steril. Ambil 0,1 ml suspensi tanah dari pengenceran 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} lalu inokulasikan pada medium agar cawan dan sebar dengan spreader. Inkubasi medium yang telah

diambil potong menjadi potongan kecil (5x1 cm, 0,1 g). Masukkan potongan-potongan menjadi potongan kecil (5x1 cm, 0,1 g) ke dalam tabung. Tambahkan 2 ml *glass beads* steril dan tambahkan 5 ml air steril ke dalam tabung. Kocok dengan vortex selama 3 menit. Saring dengan saringan stainless steel steril (0,3 mm). Suspensi diencerkan sampai pengenceran 10^{-6} dengan akuades steril. Ambil 0,1 ml suspensi tanah dari pengenceran 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} lalu inokulasikan pada medium agar cawan dan disebar dengan spreader. Inkubasi medium yang telah diinokulasi pada suhu ruang selama 2 – 5 hari. Masing-masing pengenceran diambil 0,1 ml lalu diinokulasikan ke dalam medium lalu tetesan suspensi pada medium disebar menggunakan batang penyebar. Medium diinkubasi pada suhu ruang selama 2-5 hari.

3.1.4.5.2. Aktinomiset

Sampel tanah atau serasah diencerkan dengan air steril lalu suspensi sampel diinokulasikan dengan cara disebar ke medium isolasi Humic acid-vitamin agar. Medium yang telah diinokulasi kemudian diinkubasi pada suhu ruang selama 14-20 hari. Koloni tunggal diisolasi, dimurnikan, dan diremajakan dan untuk selanjutnya diseleksi kemampuannya dalam merombak selulosa.

3.1.5. Seleksi mikroba selulolitik

3.1.5.1. Seleksi secara kualitatif

Secara kualitatif mikroba selulolitik dapat diseleksi dengan menumbuhkan mikroba pada media *carboxymethyl cellulose* (CMC) Agar cawan Petri. Biakan fungi dari media PDA diambil menggunakan *cork borer* lalu diinokulasikan ke media CMC Agar cawan pada pusat media. Sedangkan untuk biakan bakteri dari biakan *Nutrient Agar* (NA) atau aktinomiset dari biakan diambil satu lup lalu diinokulasikan ke media CMC Agar dengan cara digoreskan. Biakan diinkubasi pada suhu ruang atau lebih tinggi untuk mikroba toleran suhu tinggi 2-5 hari. Setelah inkubasi, mikroba selulolitik dapat dideteksi dengan cara pemberian warna merah Kongo 0,5% pada permukaan agar cawan selama 10 menit lalu sisa berwarna dibuang, dicuci dengan air dan permukaan media agar dicuci dengan NaOH 1 M/NaCl 1 M beberapa kali. Keberadaan zona jernih sekitar koloni menunjukkan bahwa mikroba tersebut memiliki aktivitas selulolitik dengan menghasilkan enzim selulase ekstraseluler.

3.1.5.2. Seleksi secara kuantitatif

Mikroba diuji aktivitas selulolitiknya dalam memproduksi enzim selulolitik di dalam media produksi enzim yang mengandung selulosa murni, kertas filter, jerami sebagai substrat. Media Czapek, Asparagine dan Mandel serta Reese dapat digunakan untuk penentuan tingkat produksi selulase oleh fungi. Media lain digunakan untuk skrining bakteri dan aktinomisetes selulolitik.



(A)



(B)

Gambar 11. (A) Fungi selulolitik pada media seleksi CMC (carboxymethyl cellulose) agar dan (B) Fungi selulolitik pada media PDA

Mikroba uji diinokulasikan sebanyak 20 ml ke dalam 100 ml media produksi dalam erlenmeyer 250 ml lalu diinkubasi pada mesin penggoyang rotary pada suhu ruang. Selulase dan miselium yang tidak digunakan dipisahkan dengan sentrifugasi pada kecepatan 10.000 rpm pada suhu 4°C selama 20 menit. Aktivitas selulolitik (CMCase, β -glukosidase, dan FPase) ditentukan dengan mengukur gula pereduksi yang dibebaskan pada pengukuran aktivitas enzim. Penentuan gula pereduksi dilakukan dengan menggunakan pereaksi DNS (Dinitrosalicylic acid) dan glukosa sebagai gula standar yang diukur dengan Spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm. Satu unit (U) aktivitas enzim CMCase/ β -glukosidase/ FP (*filter paper*) adalah banyaknya enzim yang dapat memproduksi 1 mikromol glukosa dalam 1 menit pada kondisi pengukuran enzim (Miller, 1957 dalam Irawadi, 1990).

Tahap berikutnya dari seleksi mikroba selulolitik unggul adalah melakukan uji efektivitas pada substrat bahan organik alami.

3.2. Teknologi Mikroba Lignolitik dan Aplikasinya

Perombakan bahan organik merupakan bagian yang terpenting dalam siklus karbon di alam. Penjagaan karbon dalam bentuk tersimpan adalah upaya yang penting untuk mengantisipasi terjadinya perubahan iklim. Selama proses dekomposisi berlangsung terjadi tiga proses paralel yaitu (1) perombakan sisa tumbuhan atau hewan oleh enzim-enzim yang dihasilkan mikroba; (2) peningkatan biomassa mikroba yang terdiri atas polisakarida dan protein; dan (3) akumulasi atau pelepasan hasil akhir (Rao, 1994).

Mikroba berperan sebagai pengurai biomassa tumbuhan yang tersusun dari senyawa selulosa, hemiselulosa dan lignin melalui proses biosintetik dan biodekomposisi. Kecepatan dalam penguraian tersebut tergantung pada kemampuan masing-masing mikroba untuk menghasilkan enzim selulase dan lignase.

Potensi sumber daya mikroba *indigenous* Indonesia belum banyak diteliti dan dikembangkan terutama terkait dengan pemanfaatan mikroba non-patogenik yang mampu mendegradasi selulosa dan lignin. Berdasarkan pernyataan Hawkswort (1991) dan Gandjar *et al.* (2006) diperkirakan jumlah perkiraan total fungi sekitar 1.500.000 spesies dan sampai tahun 1996 baru terdeskripsi sekitar 69.000 spesies.

Maraknya isu pemanasan global, menuntut dikurangnya penggunaan pupuk dan pestisida kimia untuk memacu produktivitas pertanian yang sering berdampak pada munculnya gas rumah kaca seperti CH_4 dan N_2O . Aplikasi kompos yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik menggunakan mikroba selulolitik dan lignolitik menjadi pilihan untuk menunjang pertanian yang berkelanjutan dan untuk mengantisipasi dampak gas rumah kaca.

3.2.1. Lignin

Sebagian besar biomassa yang menyusun tanaman terdiri atas senyawa selulosa dan lignin. Komposisi masing-masing senyawa penyusun bahan organik berbeda berdasarkan sumber tanamannya. Selulosa yang terkandung di dalam jerami padi, kuantitasnya berbeda dengan selulosa yang terkandung di dalam serasah tanaman tebu dan kayu pinus. Begitu juga dengan kandungan lignin, masing-masing tanaman berbeda-beda.

Pada batang tanaman, lignin berfungsi sebagai bahan pengikat komponen penyusun lainnya, sehingga suatu tanaman bisa berdiri tegak. Berbeda dengan selulosa yang terutama terbentuk dari gugus karbohidrat, lignin terbentuk dari gugus aromatik yang saling dihubungkan dengan rantai alifatik, yang terdiri atas 2-3 karbon. Pada prosesis lignin, dihasilkan senyawa kimia aromatis yang berupa fenol, terutama kresol (Wikipedia, 2008).



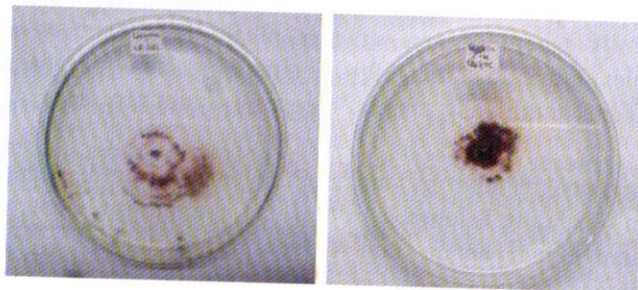
Gambar 14. Beberapa jamur yang mengurai kayu

Sebagian fungi yang mampu mendegradasi lignin adalah dari kelompok Jamur basidiomisetes merupakan kelompok utama pendegradasi lignin. Walaupun beberapa bakteri diketahui dapat mendegradasi lignin, tetapi bakteri yang mampu mendegradasi lignin secara kompleks belum pernah dilaporkan.

Serangan bakteri pada bahan organik yang memiliki kandungan lignin tinggi seperti kayu berjalan sangat lambat bila dibandingkan dengan serangan yang dilakukan oleh jamur. Berbagai spesies bakteri tidak dapat menyerang dinding-dinding sel kecuali kandungan lignin dikurangi dengan perlakuan kimia.

3.2.3. Teknik isolasi mikroba lignolitik

Untuk mendapatkan mikroba yang unggul dalam kemampuannya untuk mengurai atau mendegradasi lignin perlu dilakukan isolasi. Mikroba unggul tersebut dapat diisolasi dari kompos yang terbentuk secara alami di alam, jerami atau kayu yang ditumbuhi jamur tertentu, serasa hutan primer atau bahan yang lainnya. Media yang dipakai untuk mengisolasi mikroba lignolitik adalah media agar selektif lignin – benomyl – guaiacol. Secara kualitatif mikroba yang mampu mendegradasi lignin bila ditumbuhkan di media agar selektif tersebut akan menunjukkan adanya warna merah tepat di bawah dan sekitar koloni akibat quinon produk oksidasi guaiacol.



Gambar 15. Fungi lignolitik yang diuji pada media agar selektif lignin – benomyl – guaiacol menunjukkan warna merah di sekitar koloninya (Fungi lignolitik koleksi Surono SP, Balai Penelitian Tanah)

3.2.3.1. Komposisi media selektif – benomyl – guaiacol

Komposisi bahan media agar selektif lignin – benomyl – guaiacol per liter yang digunakan untuk mengisolasi dan menyeleksi mikroba yang mampu mendegradasi lignin adalah: medium basal lignolitik yang terdiri atas 0,5 g KH_2PO_4 , 0,2 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,1 g NH_4NO_3 , 0,1 g KCl, 0,02 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,05 g $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 2 g malt ekstrak, dan 15 g agar. Kemudian bahan – bahan tersebut diautoklaf, setelah itu ketika suhu 55°C, tambahkan bahan – bahan sebagai berikut 5 ml larutan KOH 1 M; 0,4 ml guaiacol; 1 g indulin AT (alkali lignin) yang disiapkan dengan cara melarutkan dalam 10 ml dioksan; 60 mg antibiotik Clortetracycline-HCl; 30 mg streptomisin sulfat; 30 mg penisilin G dan 4 mg benomil, lalu kocok dan tuang ke dalam cawan Petri. Kemudian siapkan larutan Diazodium Blue B (DBB) 1 mg/ml dengan melarutkan 10 mg DBB dalam 10 ml bufer Tris HCl 0,1 M Ph 7, dingin.

3.2.3.2. Prosedur isolasi mikroba lignolitik

Prosedur isolasi mikroba lignolitik (Thorn *et al.*, 1996) adalah sebagai berikut: Masukkan 5 g berat basah contoh tanah dimasukkan ke dalam 500 ml natrium pirofosfat 0,1% (w/v) steril dalam botol Mason 1 L, terus kocok pada inkubator penggoyang selama 1 jam dengan suhu 4°C untuk mendispersikan gumpalan tanah dan koloid, suspensi tanah disaring menggunakan saringan bertingkat no. 60 (250 μm) dan No. 270 (53 μm) dan cuci dengan air mengalir dingin secara singkat, partikel yang tertinggal pada saringan mesh 53 μm dicuci dengan akuades selama 5 menit, satu ml suspensi partikel organik diencerkan dalam air steril sampai 10^2 dan sebanyak 0,4 ml dari pengenceran tersebut disebar pada media agar lignin – guaiacol – benomil lalu inkubasi pada suhu ruang selama 2 minggu, kemudian seujung kecil jarum partikel pada saringan mesh 53 diinokulasi ke dalam medium agar isolasi lignin – benomil – guaiacol, inkubasi pada posisi terbalik selama 1 – 2 minggu pada suhu ruang, amati setiap melihat adanya koloni yang membentuk warna merah, warna merah disebabkan aktivitas lakase atau peroksidase, amati koloni yang timbul dengan mikroskop untuk melihat adanya konidia dan *clump connections* sebagai ciri Basidiomisetes, tumbuhkan kultur dalam 75 ml medium cair malt ekstrak, pH 6 dalam erlemeyer 125 ml, inkubasi pada penggoyang 100 rpm dan suhu ruang selanjutnya panen ketika berumur 2 minggu, kemudian miselium kultur dicuci dengan akuades lalu ditaruh dalam gelas bening dan langsung warnai dengan DBB, reaksi positif yaitu dengan terbentuk warna merah sampai ungu setelah 15 – 60 detik penambahan DBB. Pemurnian dilakukan dengan memindahkan koloni mikroba lignolitik ke media agar malt ekstrak yang mengandung antibiotik, setelah diinkubasi pada suhu ruang selama 5-7 hari, pindahkan satu koloni ke medium agar miring malt ekstrak dan inkubasikan lagi, terhadap biakan murni lakukan pengamatan mikroskop untuk melihat adanya konidia dan *clump connection*.

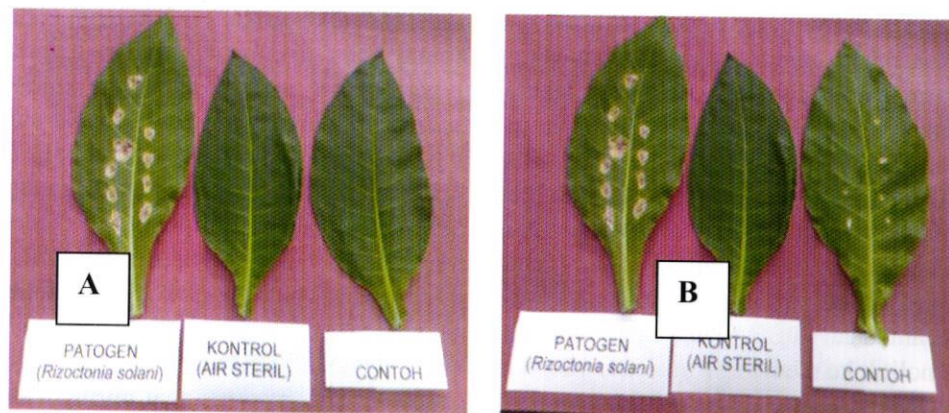
3.3. Uji Kemampuan Perombakan Bahan Organik

Material selulosa dalam tanaman sebagian besar berasosiasi dengan lignin yang lebih resisten terhadap dekomposisi sehingga perlu dilakukan uji kemampuan mikroba selulolitik terpilih dalam merombak bahan organik alami dan lebih resisten seperti jerami.

Sebanyak 6-10 g jerami dipotong-potong menjadi 1-2 cm panjangnya, lalu ditimbang dalam gelas piala 500 ml. Rasio C/N disesuaikan menjadi 40-45 dengan menambahkan nitrogen mineral dan air yang ditambahkan 1:3 (jerami pada perendaman dapat menyerap 3-5 ml air per gram). Dua seri percobaan dilakukan pada kondisi steril (autoklaf pada 20 psi, 20 menit) dan tidak steril. Masing-masing gelas piala diinokulasi 1 *disk* (6 mm) fungi uji dari medium agar, dibuat tiga ulangan dengan kontrol yang tidak diinokulasi (hanya *disk* agar kosong). Gelas piala semuanya diinkubasi selama 4 - 8 minggu pada suhu yang sesuai. Setelah 4 minggu, ambil satu set gelas piala lalu keringkan isinya sampai beratnya konstan pada suhu 105°C lalu hitung rata-rata kehilangan dalam berat kering; bandingkan kehilangan dalam berat kering dan persen dekomposisi pada periode minggu keempat dan kedelapan pada kondisi steril dan tidak steril. Kematangan bahan organik dapat juga dideterminasi sebagai ukuran biodegradasi.

3.4. Uji Patogenisitas

Mikroba selulolitik terseleksi harus melewati uji patogenisitas untuk meyakinkan bahwa mikroba selulolitik terseleksi tidak patogen terhadap tanaman dan aman bila diaplikasikan di lapang. Uji patogenitas dapat dilakukan dengan cara cepat, yaitu dengan menginokulasikan mikroba ke daun tanaman tembakau dan hasilnya dapat diamati setelah 24-48 jam.



Gambar 16. Uji patogenisitas, isolat contoh bukan merupakan mikroba patogen (A) dan isolat contoh merupakan mikroba patogen (B) dengan menunjukkan gejala nekrosis

3.2.4. Uji Kemampuan mikroba lignolitik di lapangan

Uji ini dilakukan dengan memberikan perlakuan penambahan mikroba lignolitik unggul yang telah diseleksi secara *in vitro* di laboratorium ke dalam bahan organik/sisa tanaman yang akan dikomposkan. Bahan organik yang digunakan dalam proses pengomposan adalah bahan organik yang memiliki kandungan lignin yang cukup tinggi seperti tandan kosong buah sawit, limbah pengolahan tebu, serbuk kayu gergajian, dan sabut kelapa.

Prosedur aplikasinya yaitu dengan menumbuhkan mikroba lignolitik yang unggul, misalkan untuk fungi pelapuk putih, ambil sekitar 1 ose fungi lignolitik yang ditumbuhkan di media PDA lalu masukan ke dalam erlenmeyer himpitkan sampai 1.000 ml pada media PDA cair yang telah diautoklaf. Inkubasi pada *shaker*/penggoyang selama 7 hari sehingga fungi tumbuh secara optimal dengan miselia dan spora yang cukup padat. Dosis penggunaan, untuk 1 l media PDA cair yang telah ditumbuhi fungi lignolitik dengan kepadatan minimal 10^5 spora/ml dapat untuk mengomposkan sekitar 1 t bahan organik segar sehingga dihasilkan kompos bioaktif.

Kompos bioaktif adalah kompos yang diproduksi dengan bantuan mikroba lignoselulolitik unggul yang telah diseleksi secara *in vitro* di laboratorium yang tetap bertahan di dalam kompos dan berperan sebagai penyuplai unsur hara tanaman (penambat N, pelarut P dan K), penghasil zat pemacu tumbuh dan penghasil zat anti patogen sebagai pengendali penyakit tanaman. Kebutuhan bahan organik dan hara tanaman dapat dipenuhi dengan kompos bioaktif. Aplikasi kompos bioaktif pada pertanian organik dapat menyuplai kebutuhan hara tanaman yang selama ini dipenuhi dari pupuk-pupuk kimia. Serangan hama dan penyakit tanaman dapat dikendalikan dengan memanfaatkan biokontrol yang ditambahkan ke dalam kompos. Sejumlah laporan hasil penelitian menyebutkan penggunaan kompos dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen.

Kompos bioaktif di samping diperkaya dengan strain-strain unggul mikroba, terutama mikroba tanah seperti mikroba penambat nitrogen (N), mikroba pelarut fosfat (P) dan potasium (K), penghasil zat pemacu tumbuh dan pengendali patogen tanaman juga dapat diperkaya dengan mineral atau batuan sumber hara bagi tanaman seperti batuan fosfat, feldspar, mika, dan vermikulit. Kompos bioaktif yang diinokulasikan ke benih, tanah ataupun media tumbuh (*carrier*) dengan tujuan untuk meningkatkan jumlah mikroba dan mempercepat proses terjadinya hara yang tersedia bagi tanaman sehingga meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman.



Gambar 17. Pemberian kompos bioaktif 10 t ha^{-1} (menggunakan agen dekomposer *Trichoderma* sp. lignolitik) yang ditambah dengan konsorsia mikroba mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman caisim lebih baik (A) dibanding kontrol praktek petani yang menggunakan kompos 20 t ha^{-1} (B)

Adanya kekhawatiran akan pengaruh negatif pada pemakaian pupuk kimia dan pestisida buatan pabrik telah meningkatkan perhatian masyarakat kepada pemanfaatan pupuk organik, pupuk hayati dan pestisida hayati sebagai alternatif teknologi untuk meningkatkan produktivitas lahan dan tanaman. Beberapa penelitian untuk menghasilkan teknologi yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dengan tanpa menggunakan pupuk kimia buatan telah banyak dilakukan. Salah satu teknologi yang saat ini dikembangkan adalah pengelolaan hara terpadu yang mendukung pemupukan organik dan pemanfaatan pupuk hayati. Teknologi alternatif yang potensial adalah pemanfaatan kompos bioaktif, yaitu teknologi yang dikembangkan berbasis potensi alam yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pemanfaatan kompos bioaktif diharapkan mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit, mempercepat pembungaan dan pemasakan buah serta meningkatkan efisiensi pemakaian pupuk buatan sehingga mampu meningkatkan produksi tanaman.

IV. TEKNOLOGI PENGEMBANGAN DAN PERBANYAKAN AGEN DEKOMPOSER SKALA PILOT

Perbanyakan agen dekomposer merupakan tahap pertama dalam proses produksi inokulan mikroba ligninolitik karena dalam produksi inokulan agen dekomposer membutuhkan kultur murni baik cair atau padat dalam jumlah besar. Dalam tahap perbanyakan biomassa mikroba ligninolitik dilakukan pada media dan kondisi optimum untuk menghasilkan biomassa maksimum dan memiliki kemampuan bertahan yang maksimum pula dalam bahan pembawa. Tahap berikutnya dalam produksi inokulan agen dekomposer adalah formulasi yaitu pencampuran mikroba ligninolitik dengan bahan pembawa sehingga mudah dalam distribusi dan aplikasinya. Oleh karena itu, bahan pembawa inokulan haruslah dapat mempertahankan viabilitas dan fungsi inokulan dalam waktu yang lama.

Pengembangan dilakukan untuk tujuan memperoleh media perbanyakan biomassa yang berharga murah dan mudah didapat, pencarian formula bahan pembawa yang mampu memperbanyak dan mempertahankan viabilitas dan fungsi inokulan dalam waktu lama.

Dalam tulisan ini dijelaskan teknologi pengembangan dan perbanyakan mikroba dekomposer yang dilakukan pada skala pilot.

4.1. Perbanyakan Biomassa Mikroba Ligninolitik

Pilihan media, penyiapan, dan sterilisasi

Media perbanyakan fungi bisa berupa medium cair atau medium padat. Media standar yang sudah tersedia adalah media *potato dextrose agar* (PDA), yang dapat digunakan sebagai media padat atau media cair (*broth*) tanpa penambahan agar *potato dextrose broth* (PDB). Media PDB untuk perbanyakan dapat dimodifikasi misalnya mengganti glukosa atau dekstrosa sebagai sumber karbon dengan gula pasir atau molase yang lebih murah. Begitu pula, ekstrak kentang yang merupakan komponen PDA atau PDB dapat dibeli dalam bentuk tepung dengan harga murah. Ekstrak kentang dapat diganti dengan ekstrak jagung atau tauge yang dapat dibuat sendiri. Media padat lain yang lebih murah dapat dibuat dari biji-bijian (gandum, jagung, beras), potongan jerami, rumput dan daun-daunan, blotong (limbah tebu) dan lain-lain. Media padat dan cair dapat digunakan untuk membuat biakan starter dan sebagai media perbanyakan. Untuk fungi yang membentuk konidia atau spora seperti *Trichoderma* dan *Aspergillus* untuk keamanan dalam menghindari penyebaran spora lebih aman disiapkan dengan menggunakan media cair.

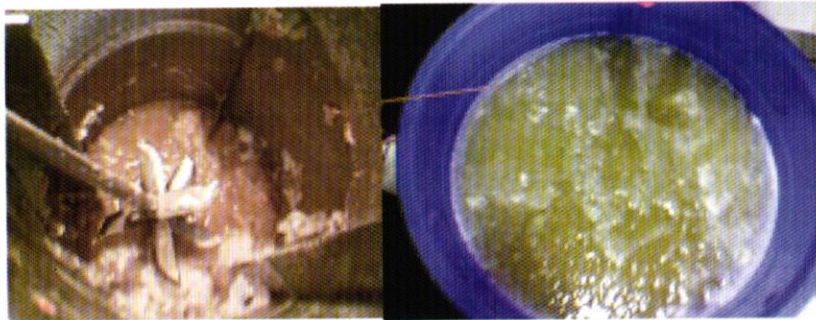
Media perbanyakan bakteri dapat menggunakan media umum seperti Nutrien Agar atau King'S B dimana komponen sumber nitrogennya dapat diganti dengan hidrolisat kedelai, ragi, atau susu skim.



Gambar 20. Fermentor stainless steel 30 l, kapasitas 15 l

Pemanenan dan pengenceran

Setelah waktu inkubasi, miselium fungi atau propagul aktinomisetes dicacah dengan mesin pencacah selama 1 menit menjadi potongan-potongan miselium sehingga diperoleh populasi propagul yang lebih banyak, kemudian dituang ke wadah pengenceran. Dalam wadah pengenceran, biakan fungi diencerkan dengan air steril. Untuk kultur bakteri atau biakan bakteri selulolitik bisa langsung diencerkan dalam wadah pengencer.



Gambar 21. Biakan fungi yang telah dicacah dalam fermentor dan biakan fungi dalam wadah pengenceran

4.2. Formulasi

Formulasi dilakukan untuk mencampur inokulan agen dekomposer dengan bahan pembawa cair atau padat. Inokulan bisa tunggal yaitu terdiri satu jenis namun dengan fungsi ganda atau inokulan konsorsia yaitu lebih dari satu jenis fungi dengan fungsi masing-masing yang saling melengkapi dan tidak saling anti tetapi dapat berdampingan berkembang dan bertahan hidup dalam bahan pembawa.

Bahan pembawa yang baik harus memiliki sifat-sifat sebagai berikut tidak beracun terhadap mikroba dekomposer, memiliki kapasitas pegang air yang baik (sebagai contoh pada gambut, kadar air tidak lebih dari 15% sebelum pencampuran dengan inokulan), memiliki pH yang sesuai, memiliki ukuran partikel relatif kecil atau halus dan seragam bila bahan pembawa padat dan tidak membentuk gumpalan tetapi remah, dan dapat diperoleh dalam jumlah besar dengan harga murah. Bahan pembawa berbetuk padat yang biasanya digunakan diantaranya gambut, arang, serasah, bahan organik seperti jerami, blotong, bekatul, dan *coco dust*. Bahan pembawa berbentuk cair bisa menggunakan air kelapa, limbah cair tahu, molase, dan lain sebagainya. Bahan pembawa baik bentuk cair, padat, atau granula diformula dengan mencampurnya dengan bahan-bahan yang membuat kondisi optimum sehingga mikroba dapat berkembang dan bertahan. Penambahan kapur (CaCO_3) ke dalam bahan pembawa biasanya dilakukan untuk meningkatkan pH sehingga optimum bagi mikroba dekomposer.

Bahan pembawa bisa digunakan dalam keadaan steril atau tidak steril. Sterilisasi dilakukan menggunakan gama iridiasi atau autoklaf (15 psi, 121°C, 1 jam) atau pasteurisasi (3-4 jam). Sebelum diautoklaf atau dipasteurisasi bahan pembawa padat dikemas dalam plastik-plastik tahan panas dengan pori yang dapat mempertahankan kelembapan bahan pembawa namun masih memungkinkan masuknya udara untuk mikroba aerob.

Inokulan dicampurkan ke dalam bahan pembawa sampai kelembapan akhir menjadi 40-60% untuk bahan pembawa padat. Satu hal lagi yang perlu diperhatikan dalam pencampuran inokulan ini selain faktor kelembapan akhir bahan pembawa adalah populasi akhir mikroba selulolitik dalam bahan pembawa harus mencapai minimal 1×10^7 cfu/g bahan pembawa untuk bakteri atau 1×10^5 cfu/g bahan pembawa untuk fungi setelah masa inkubasi dan sebelum akhir masa kadaluarsa. Untuk bahan pembawa granula, pencampuran inokulan dilakukan dengan cara menyemprotkan inokulan pada granula yang sudah terbentuk.

Kemampuan bertahan mikroba dalam bahan pembawa bergantung pada sifat mikroba dan kondisi bahan pembawa. Mikroba yang membentuk struktur dorman seperti spora pada fungi dan aktinomisetes, endospora pada bakteri serta struktur cadangan makanan seperti polihidroksi butirat (PHB) pada sebagian besar bakteri dapat meningkatkan kemampuan mikroba bertahan dalam bahan pembawa yang memiliki nutrisi terbatas. Faktor lingkungan yang mempengaruhi kemampuan bertahan mikroba yang paling penting selain ketersediaan nutrisi adalah kelembapan atau kadar air dalam formula inokulan. Kadar air formula inokulan semakin lama seiring waktu semakin berkurang.

V. TEKNOLOGI BIO RECYCLE ORGANIC VERMICOMPOSTING (TEKNOLOGI BRAVO)

Vermikompos disebut juga kompos cacing, vermicast atau pupuk kotoran cacing, merupakan hasil akhir dari penguraian bahan organik oleh jenis-jenis cacing tertentu. Vermikompos sesuatu yang kaya hara, sebagai pupuk alami dan sebagai *soil conditioner* (pembenah tanah). Proses pembuatan verмикompos disebut vermicomposting. Pengomposan bertujuan mempercepat proses dekomposisi bahan organik, sehingga hara yang terdapat dalam bahan organik lebih cepat tersedia bagi tanaman. Pengomposan dengan menggunakan cacing tanah sebagai dekomposer dominan (sejatinya vermicomposting merupakan kerjasama yang terintegrasi antara cacing tanah dan mikroba) bertujuan meningkatkan kualitas kompos (vermikompos), sehingga manfaatnya bagi pertanian juga meningkat. (Lake and Supak, 1996 dan Morarka, 2005)

Dalam proses pembuatan verмикompos (vermicomposting) melibatkan dua komponen bahan utama yaitu cacing tanah itu sendiri sebagai dekomposer dan bahan organik yang diperlukan sebagai bahan yang akan didekomposisi. Masing-masing bahan ini memerlukan jalur pengadaan dan organisasi tersendiri, misalnya untuk bahan organik bisa berasal dari sisa panen tanaman pertanian seperti jerami padi, batang-batang jagung dan tandan kosong kelapa sawit yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal, atau dari sampah organik yang berasal dari sampah pasar atau sampah rumah tangga yang sifatnya kumulatif dan menimbulkan berbagai masalah yang sampai saat ini sebagian besar pengelolaannya masih konvensional.

Teknologi **Bio Recycle Organik Vermicomposting (BRAVO)**, mengelola sesi panen dan sampah organik menjadi sesuatu yang mempunyai nilai manfaat yang optimal. Konsep dasar teknologi "BRAVO" adalah mengubah pandangan terhadap sisa panen dan sampah sebagai bahan buangan menjadi sisa panen dan sampah sebagai sumber daya, hal ini dapat berarti pula mengubah konsep dari aktivitas membuang menjadi aktivitas mengelola.

Pengadaan cacing tanah sebagai dekomposer bisa melalui beberapa cara yaitu dengan bekerjasama atau membeli dari penangkar penangkar yang sudah ada, pengadaan dengan cara menangkap langsung di lapangan (tanah-tanah kosong, tanah-tanah perkebunan), kemudian dikumpulkan, diwadahi lalu digunakan langsung untuk dekomposisi bahan organik, atau diperbanyak/dipelihara dulu kemudian setelah cukup banyak baru digunakan sebagai dekomposer (Sudiarto *et al.*, 1996). Dalam buku panduan ini dijelaskan cara proses penyediaan, pengadaan dan pengelolaan bahan organik dan cacing tanah dan teknologi verмикompos.

5.1. Penyediaan Bahan Organik

Sebagai sumber bahan organik untuk pembuatan vermikompos diperoleh dengan cara mengumpulkan sisa-sisa panen pertanian (Hill., 2004), seperti jerami padi, brangkasan jagung atau tandan kosong kelapa sawit (tangkos), atau berasal dari sampah kota dan sampah rumah tangga (Listyawan *et al.*, 1998). Bahan organik dari dua sumber ini mempunyai karakteristik yang berbeda seperti kadar air, homogenitas bahan organik maupun ukuran struktur bahan organik.

5.1.1. Sisa panen tanaman pertanian

Bahan organik sisa panen tanaman pertanian sebagian besar belum banyak dimanfaatkan sebagai kompos maupun sebagai vermikompos. Sisa panen atau brangkasan dari tanaman pertanian yang dikumpulkan di galengan/pematang atau di pinggir petakan (yang biasanya kemudian dibakar), kemudian diproses lebih lanjut untuk dijadikan kompos atau vermikompos. Sisa panen atau brangkasan ini yang strukturnya besar-besar, diproses agar strukturnya lebih kecil yaitu dengan dipotong-potong menggunakan parang atau golok atau "chopper", sehingga potongan potongan menjadi panjang sekitar 5-10 cm, kemudian dikumpulkan dalam satu tempat lalu diangkut ke tempat pemrosesan vermikompos. Bahan sisa panen seperti tandan kosong kelapa sawit dalam pemrosesan ini perlu lebih hati-hati karena selain berduri tajam juga jaringan tanamannya alot (liat) dibanding sisa panen tanaman pangan seperti jerami atau brangkasan jagung, sehingga diperlukan alat pemotong yang tajam. Bahan organik sisa panen yang masih segar sebaiknya dilayukan terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai bahan vermikomposting.

5.1.2. Sampah pasar/ sampah rumah tangga

A. Akumulasi sampah

Sampah atau sering juga disebut sebagai limbah padat merupakan material sisa dari aktivitas manusia/masyarakat yang tidak terpakai/termanfaatkan sehingga dibuang/disingkirkan dari lingkungan. Tidak termasuk dalam pengertian sampah disini adalah limbah klinis atau limbah lainnya yang termasuk kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Telah diketahui bahwa rata-rata komposisi sampah kota sekitar 60-70% adalah sampah organik, sedangkan sisanya yaitu 30-40% merupakan sampah anorganik (Listyawan *et al.*, 1998). Sampah anorganik adalah sampah yang tidak dapat membusuk (terdekomposisi) dalam waktu relatif cepat misalnya potongan besi, kaca, kaleng, plastik dan sebagainya. Adapun sampah organik adalah sampah yang dapat terdekomposisi dalam waktu relatif cepat, misalnya sisa makanan, sisa sayuran, dan sampah taman (potongan rumput, daun-daunan). Sumber sampah organik kota antara

lain berasal dari rumah tangga, pasar, usaha jasa boga/rumah makan, tempat pemotongan hewan, taman, dan rumah sakit.

Sampah yang dihasilkan setiap hari menimbulkan berbagai permasalahan bagi lingkungan karena sifatnya yang akumulatif, sehingga dapat mengakibatkan:

- Pencemaran udara, tanah, dan sumber air
- Merupakan sumber berbagai macam penyakit
- Mengganggu estetika (keindahan) lingkungan
- Penurunan kualitas lingkungan

B. Teknologi vermikompos

Pengelolaan sampah yang selama ini dilakukan, yaitu dengan dikumpulkan kemudian dibuang ke TPA (tempat pembuangan akhir), masih berorientasi pada pemusnahan sampah tersebut di akhir proses. Penanganan sampah secara modern seperti teknologi landfill dengan pembakaran menggunakan incenerator membutuhkan sarana, prasarana dan biaya yang besar. Selain itu sebagian besar sampah kota dalam kondisi basah sehingga dibutuhkan energi yang banyak untuk memusnahkannya. Cara-cara ini tidak dapat dipertahankan lagi karena akan menimbulkan berbagai masalah. Oleh karena itu perlu dicari alternatif pengelolaan sampah yang dapat menekan kemungkinan masalah yang terjadi akibat terjadinya timbunan sampah tersebut, dan diharapkan dapat memberikan nilai tambah dengan memanfaatkan sampah sebagai sumber daya alam.

Salah satu alternatif pengelolaan sampah, khususnya sampah organik adalah dengan teknik "Bio Recycle Organic Vermicomposting" (BRAVO). Teknologi "BRAVO" adalah teknologi penguraian bahan organik yang melibatkan cacing tanah sebagai dekomposer dominan. Hampir semua sampah organik dapat dikelola dengan teknologi ini, karena cacing tanah termasuk omnivor. Selain itu, skala pengoperasian teknologi tersebut dapat dilakukan dengan berbagai skala, mulai dari skala terkecil (skala rumah tangga) sampai skala besar. Konsep teknologi "BRAVO" selain menghasilkan vermikompos yang berasal dari bahan organik sisa panen pertanian dan sampah, diharapkan dapat mengatasi permasalahan sampah khususnya sampah organik. Pengetahuan mengenai cacing sebagai dekomposer adalah syarat utama yang harus dimiliki sebelum memulai aktivitas teknik "BRAVO".

5.2. Penyediaan Cacing Tanah

Cacing tanah yang diperlukan untuk proses vermikompos diperoleh dengan cara 1. menangkap/mengumpulkan langsung dari alam dan 2. perbanyakan cacing tanah.

Menangkap cacing tanah dari lapangan/alam dengan cara menggunakan umpan kotoran ternak/rumen ruminansia. Kotoran ternak dihamparkan di permukaan tanah sebagai umpan pada siang atau sore hari, pada malam harinya umpan di lihat dan cacing tanah yang berkeliaran di permukaan tanah ditangkap dan dikumpulkan pada wadah yang telah diisi media campuran antara tanah dan kotoran ternak dengan perbandingan 2 : 1, ditambah kapur dan TSP masing-masing 1% (Balai Penelitian Tanah, 2004). Apabila cacing tanah telah dianggap cukup banyak untuk pembuatan vermikompos, penangkapan cacing dihentikan, namun apabila cacing tanah yang diperoleh dalam penangkapan ini dianggap masih kurang mencukupi cacing bisa dipelihara dan diperbanyak terlebih dahulu, dan setelah dianggap mencukupi jumlahnya baru cacing tanah tersebut dipergunakan untuk pembuatan vermikompos.

Pemilihan lokasi untuk penangkapan cacing tanah dipilih tempat-tempat yang diperkirakan banyak cacing tanah, seperti tempat yang tidak terlalu kering atau kondisi tanah lembap, agak tertutup dari cahaya matahari langsung seperti dibawah naungan pohon di lokasi perkebunan karet atau kelapa sawit yang pohon-pohonnya sudah tinggi/kanopinya sudah tertutup atau di lantai hutan.

5.2.2. Perbanyak cacing tanah

Sebelum memperbanyak cacing tanah para penangkar perlu mengetahui dan mempelajari berbagai hal yang berkaitan dengan sifat-sifat dan kebiasaan cacing tanah sehingga mengenal betul keinginan/kebiasaan cacing tanah yang dipelihara, sehingga penangkaran berhasil dan diperoleh hasil yang memuaskan.

A. Mengenal cacing tanah

Cacing tanah termasuk dalam filum Annelida. Annelida dalam bahasa latin berarti cincin. Semua annelida adalah hewan bertubuh lunak dan bersegmen-segmen. Lebih dari 6.000 spesies anelida yang telah diketahui, dan yang terbesar adalah hidup/tinggal di laut. Akan tetapi di antara seluruh annelida yang paling dikenal dengan baik adalah cacing tanah. Para ahli telah mengelompokkan lebih lanjut lagi cacing tanah ke dalam kelas Oligochaeta dan ordo Opisthopora. Semua oligochaeta memiliki seta/rambut yang terdapat pada bagian luar tubuh yang digunakan untuk pergerakan. Ada sekitar 1.800 spesies cacing tanah yang telah dikenal (Schwert, 1990).

B. Karakteristik cacing tanah

Semua cacing tanah adalah bisexual-hermaprodit, akan tetapi hampir seluruh cacing tanah tidak dapat melakukan fertilisasi sendiri. Untuk reproduksi, dua ekor cacing tanah harus berkopulasi, saling mempertukarkan sel-sel sperma. Cacing tanah

memiliki sifat fototaksis negatif, yaitu menjauhi arah datangnya cahaya. Untuk menghindari cahaya, cacing tanah melakukan sembunyi di dalam tanah (*burrowing*). Hal ini berkaitan untuk menghindari kekeringan dan pemangsa. Oleh karena itu cacing tanah bersifat nokturnal, yaitu aktif di waktu malam (gelap).

C. Umur cacing tanah

Para ilmuwan sampai saat ini belum mengetahui dengan pasti umur cacing tanah. Edwards dan Lofty (1977) menyimpulkan dari penelitian berbagai peneliti bahwa untuk cacing tanah famili Lumbricidae memiliki potensi lama hidup antara 4-8 tahun. Adapun siklus cacing tanah adalah sebagai berikut:



Gambar 22. Siklus hidup cacing tanah

D. Struktur cacing tanah

Tubuh cacing tanah terbagi menjadi segmen-segmen. Segmen paling depan disebut prostomium. Diikuti oleh segmen berikutnya yang dianggap sebagai segmen pertama. Pada segmen pertama ini terdapat mulut, oleh karena itu disebut peristomium. Bagian-bagian tubuh dapat dibedakan atas:

Anterior: Bagian depan/kepala
 Posterior : Bagian belakang/ekor
 Dorsal : Bagian atas/punggung
 Ventral : Bagian bawah/perut

Lapisan mukosa pada kulit cacing tanah membantu mempertahankan kelembapan. Kelembapan ini sangat penting bagi proses pertukaran gas oksigen dan karbon dioksida (pernafasan) karena cacing tanah tidak memiliki paru-paru, pertukaran gas dilakukan melalui seluruh permukaan tubuh. Lapisan mukosa juga berperan sebagai pelicin yang sangat efektif untuk membantu pergerakan cacing tanah menembus tanah. Selain itu lapisan mukosa ini berperan penting dalam proses reproduksi cacing tanah. Mukosa khusus diproduksi saat terjadi perkawinan antara dua ekor cacing yang berfungsi melindungi spermatozoa yang dilepaskan/ dipertukarkan.

Ada bentuk khusus pada tubuh cacing tanah yang dapat terlihat dengan pandangan mata. Terdapat dekat ujung anterior, warna terlihat berbeda dengan warna seluruh tubuh, bentuk khusus ini dinamakan klitelum. Klitelum berperan penting dalam kopulasi dan reproduksi cacing tanah.

E. Reproduksi cacing tanah

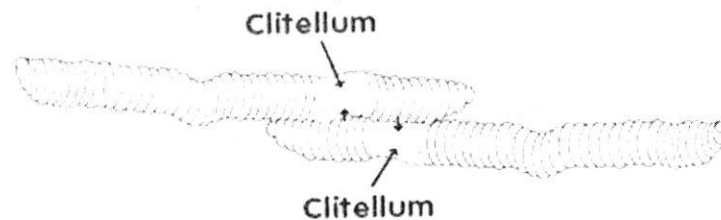
Cacing tanah adalah hewan hermaprodit yaitu organ jantan dan betina terdapat dalam satu tubuh. Akan tetapi cacing tanah tidak dapat melakukan pembuahan sendiri. Cacing tanah harus melakukan kopulasi dengan cacing tanah lainnya untuk menghasilkan kokon yang berisi beberapa bakal juvenil. Sebagai contoh saat ini telah diketahui reproduksi cacing tanah *Lumbricus Rubellus* adalah sebagai berikut:

Produksi kokon 2 - 3 butir kokon per minggu.

Jumlah juvenil yang muncul dari satu kokon adalah 1-4 juvenil.

Waktu inkubasi kokon s.d terbentuk juvenil adalah 14-21 hari.

Usia dewasa kelamin adalah 2,5-3 bulan.



Gambar 23. Cacing tanah adalah hewan hemaprodit (satu tubuh mempunyai dua jenis kelamin), namun untuk bisa melakukan pembuahan dua ekor cacing saling berkopulasi

F. Substansi kimia pembentuk tubuh cacing tanah

Unsur utama pembentuk tubuh cacing tanah adalah air, 70-95% dari berat tubuh. Kehilangan air dari tubuh merupakan masalah utama dari kehidupannya. Namun cacing tanah mempunyai kemampuan bertahan hidup dengan gerakan yang lebih sesuai atau dengan diam. Sisanya 5-30% sebagian besar adalah protein yang merupakan pembentuk tubuh. Protein terdapat antara 53-72% dari total berat kering tubuh. Lemak yang tersebar diseluruh tubuh terdapat antara 1-17% dari berat kering tubuh, dan unsur mineral lainnya 9-23%. Hasil analisis terhadap kandungan protein cacing tanah menunjukkan keseimbangan komposisi asam amino esensial yang bagus, terutama kaya asam amino lysine. Beberapa percobaan pemberian pakan

menggunakan cacing tanah sebagai sumber protein memperlihatkan secara nutrisi daging cacing tanah sebanding dengan daging ikan yang diberikan untuk pakan ternak unggas, babi, dan tikus percobaan.

G. Spesies cacing tanah

Cacing termasuk dalam invertebrata yaitu kelompok hewan yang tidak bertulang belakang. Dalam ilmu taksonomi, cacing (vermes) dikelompokkan ke dalam tiga Phylum yaitu Platyhelminthes, Aschelminthes (Nemathelminthes), dan Annelida.

Beberapa ilmuwan telah mengelompokkan cacing tanah menjadi dua kelompok yaitu merah dan abu-abu. Famili yang termasuk dalam kelompok merah antara lain *Lumbricus*, *Eisenia* dan *dendroboena*, dan di antara familia-familia tersebut yang telah dikenal baik seluruhnya adalah dari famili Lumbricidae seperti *Lumbricus terrestris* (the native night crawler), *L. Rubellus* (the red worm) dan *Eisenia foetida* (the bradling worm). Kelompok abu-abu antara lain dari genus *Allobophora* dan *Octolasion* (keduanya adalah Lumbricidae) dan yang sudah dikenal dengan baik adalah *Allobophora caliginosa* (the field worm). Cacing tanah yang paling banyak dibudidayakan di Indonesia adalah *Lumbricus rubellus*, dengan klasifikasinya sbb:

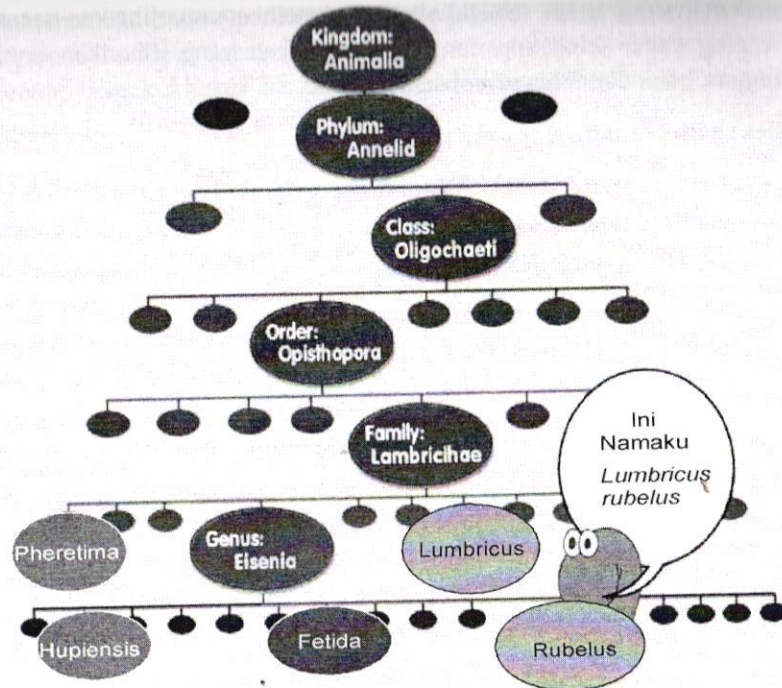
Kingdom	: Binatang (hewan)
Filum	: Annelida (tubuh beruas-ruas)
Kelas	: Oligochaeta (tubuh berbulu halus-dapat terlihat dengan mikroskop)
Ordo	: Opisthopora (pada tiap ruas terdapat sepasang lubang)
Famili	: Lumbrichae (tubuh berlumur)
Genus	: <i>Lumbricus</i> (tiap ruas berstrip/tidak, gemuk/langsing)
Spesies	: Warna merah muda, merah, gendola (ungu)/abu abu

Contoh: *Lumbricus rubellus*: lambat, warna keungu-unguan/merah tua

: *Pheretima hupiensis*: langsing, merah muda, tidak berstrip

: *Eusemia fetida*: gemuk, merah, segmen berstrip.

L. rubellus bukan jenis cacing tanah asli Indonesia, tapi merupakan jenis cacing tanah berasal dari Eropah. Sekarang spesies ini umum dibudidayakan.



Gambar 24. Pohon klasifikasi cacing tanah model Herman's Adventure (<http://www.urbanext.uiuc.edu/worms>. 6 Sept 2004)

H. Identifikasi cacing tanah

Berikut ini merupakan penuntun untuk mengidentifikasi jenis cacing tanah *Lumbricus rubellus*. Jenis cacing tanah ini sangat baik untuk dibudidayakan dan untuk mengolah sampah. Adapun ciri ciri untuk identifikasi jenis cacing tanah tersebut adalah sbb:

- Panjang tubuh antara 80-140 mm
- Jumlah segmen 85-140 segmen
- Warna tubuh di bagian dorsal coklat merah hingga ungu kemerahan
- Warna tubuh bagian ventral krem
- Bentuk tubuh bulat, di bagian posterior tertekan dorso ventral
- Klitelum terletak pada segmen 26 atau 27 hingga 32
- Jumlah segmen pada klitelum adalah 6 hingga 7 segmen
- Lubang kelamin jantan pada segmen ke-14
- Lubang kelamin betina pada segmen ke-13
- Bentuk prostomium tanylobus yaitu segmen pertama tertarik ke dalam.

I. Ekologi cacing tanah

Cacing tanah sangat penting dalam proses dekomposisi materi organik tanah. Bersama-sama dengan hewan tanah lainnya, cacing tanah ikut berperan dalam siklus biogeokimia. Cacing tanah memakan serasah daun dan materi tumbuhan yang mati lainnya, dengan demikian materi tersebut menjadi tersobek sobek dan hancur. Proses dekomposisi selanjutnya dilanjutkan aktivitas mikroba, tetapi cacing tanah ikut berperan juga walaupun secara tidak langsung cacing tanah meningkatkan jumlah populasi mikroba tanah (Hendriksen, 1990).

Cacing tanah juga dapat mengubah kondisi tanah yang didiaminya melalui keunikan aktivitas dan perilakunya. Cacing tanah melubangi dan memakan tanah serta materi organik yang terdapat didalamnya, kemudian dikeluarkan sebagai kotoran di permukaan tanah. Aktivitas ini menyebabkan udara yang masuk ke dalam tanah lebih banyak, tanah menjadi teraduk dan terbentuk agregasi agregasi, sehingga tanah dapat menahan air lebih banyak dan menaikkan kapasitas air tanah (Subowo, 2002).

Cacing tanah juga berperan dalam mengubah rasio C/N bahan organik, dan mengubah nitrogen yang tidak tersedia menjadi tersedia (terlarut) setelah dikeluarkan berupa kotoran (*casting*). Oleh karena itu cacing tanah memiliki peran yang sangat penting pada proses dekomposisi di dalam ekosistem tanah berkaitan dengan kemampuan cacing tanah dalam:

- a. Menguraikan partikel tanah dan mencernanya sekaligus merombak materi organik yang terdapat dalam tanah.
- b. Mencampur adukan tanah dari permukaan ke lapisan tanah yang lebih dalam serta sebaliknya.
- c. Meningkatkan aerasi tanah, porositas, dan drainase tanah
- d. Meningkatkan aktivitas mikroflora dalam lambungnya untuk proses humifikasi
- e. Mencampurkan materi yang telah terhumifikasi ke dalam tanah.

J. Cacing tanah sebagai hewan ternak

Ternak adalah hewan yang telah dijinakkan dan lazim dipelihara yang segala persyaratan hidupnya serta perkembangbiakannya diatur oleh manusia untuk diambil manfaatnya sebanyak-banyaknya bagi manusia, baik sebagai konsumsi maupun untuk tujuan komersial.

Beberapa persyaratan cacing yang perlu diperhatikan untuk dipilih dan dikembangkan untuk ternak:

1. Kemampuan untuk didomestikasi

Domestikasi adalah proses menjadikan hewan liar menjadi hewan peliharaan atau dapat dibudidayakan. Pada prinsipnya domestikasi adalah mengubah

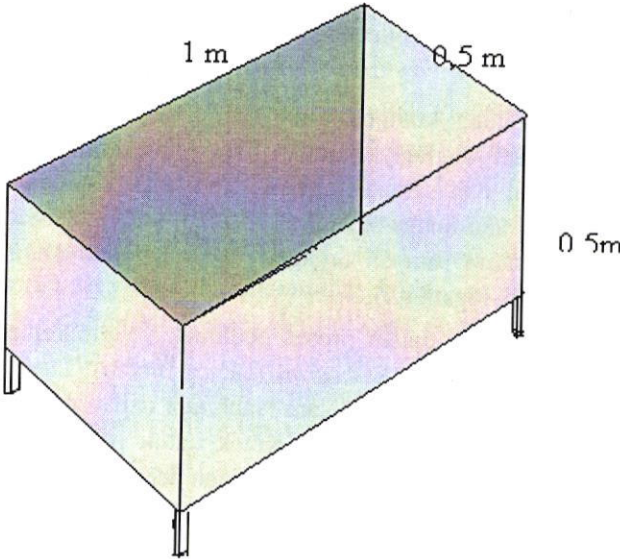
pengendalian aktivitas hidup oleh hewan itu sendiri dan lingkungan menjadi oleh manusia. Yang perlu diperhatikan adalah konsep perubahan itu bukan berarti mengubah proses hidupnya, tapi justru pengendalian manusia harus disesuaikan dengan proses alami hewan tersebut. Walaupun semua hewan mempunyai potensi untuk dibudidayakan, tapi pada prakteknya hanya sedikit yang bisa dibudidayakan. Contohnya untuk cacing tanah, dari sekitar 1.800 jenis yang telah diidentifikasi baru sekitar lima jenis yang dapat dibudidayakan. Oleh karena itu, jenis cacing tanah yang dipilih adalah cacing tanah yang mampu hidup dan beradaptasi dalam kondisi yang terkontrol oleh manusia. Langkah pertama yang harus dilakukan dalam membudi dayakan cacing tanah adalah menjinakkannya. Proses ini biasanya berlangsung lama dan sangat sedikit orang yang mempunyai keahlian untuk mampu menjadikan hewan liar menjadi hewan budi daya. Oleh karena itu cara yang lebih cepat adalah memelihara bibit cacing tanah dari yang sudah dibudidayakan.

2. Mempunyai perkembangbiakan yang tinggi

Perkembangbiakan suatu hewan adalah kemampuan untuk memperbanyak diri. Kemampuan ini berhubungan dengan reproduksi. Sedangkan kemampuan reproduksi ditentukan oleh faktor genetik atau bawaan hewan tersebut. Oleh karena itu, cacing tanah yang dipilih dari cacing tanah secara genetik mempunyai daya berkembang biak yang tinggi.

3. Pertumbuhannya cepat

Kecepatan pertumbuhan hewan dihitung mulai lahir atau menetas sampai dewasa kelamin atau dihitung berdasarkan pertambahan jumlah dan volume jaringan tubuh. Salah satu cara mengetahui pertumbuhan adalah dari pertambahan bobot hewan tersebut. Setelah dewasa pertumbuhan hewan terhenti. Kalaupun terjadi pertambahan bobot badan, yang bertambah bukan jumlah jaringan tubuh tetapi pertambahan volume jaringan lemak tubuh hewan tersebut. Pertumbuhan ada yang mengidentikkan dengan besar tubuh. Ukuran tubuh tidak bisa dijadikan patokan untuk menentukan cepat tidaknya pertumbuhan. Ada cacing tanah yang berukuran besar, tetapi waktu untuk mencapai ukuran tersebut sangat lambat. Sebaliknya ada cacing tanah yang mempunyai ukuran tubuh yang jauh lebih kecil, tetapi kecepatan untuk mencapai ukuran maksimum atau mencapai dewasa jauh lebih cepat. Maka untuk tujuan komersil, cacing tanah yang dipilih adalah cacing tanah yang cepat tumbuh. Karena pada akhirnya yang diukur adalah bukan bobot badan secara individu, tetapi bobot badan secara kelompok. Berikut ini beberapa species cacing tanah famili Lumbricidae yang telah dikembangkan di Benua Eropa (Tabel 8). Tabel tersebut menampilkan faktor-faktor yang bisa dijadikan bahan pertimbangan dalam menentukan species cacing tanah mana yang akan digunakan, khususnya untuk dekomposisi sampah.



Gambar 25. Kotak perbanyakan cacing tanah terbuat dari papan dengan ukuran panjang x lebar dan tinggi masing-masing 1m x 0,5 m x 0,5 m, diisi 30 - 40 cm media campuran tanah + rumen 2:1, ditambah TSP dan kapur masing-masing 1%, setiap bulan media diganti bersamaan panen cacing

Tabel 8. Beberapa jenis cacing tanah yang telah berhasil dikembangkan

Species/jenis	Produksin kokon/cacing/ tahun butir	Waktu inkubasi	Periode partum- buhan minggu	Total waktu perkembangan
<i>Esenia fetida</i>	11	11	55	66
<i>Lumbricus rubellus</i>	106	16	37	53
<i>Esenia rosea</i>	65	14	24	38
<i>Allobophora</i>	27	19	55	74
<i>chlorotica</i>	8	17,5	55	72,5
<i>Allobophora</i>				
<i>caliginosa</i>				

Sumber: Listyawan *et al.*, 1998

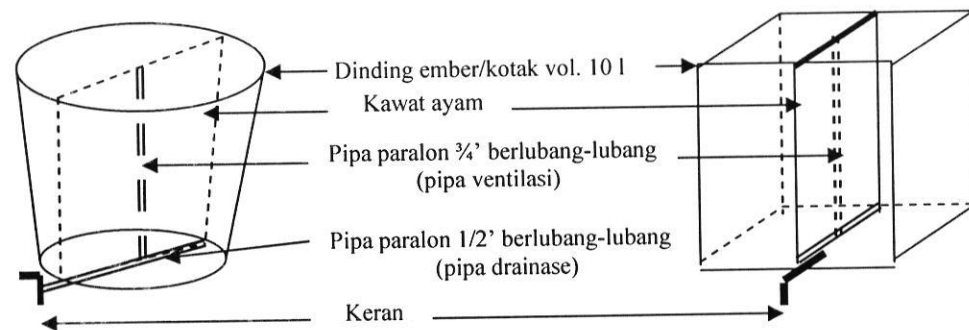
5.3. Pengomposan dengan Cacing Tanah

5.3.1. Vermikompos

Vermikompos adalah kompos hasil pengomposan menggunakan cacing tanah sebagai dekomposer utamanya. Bahan yang digunakan adalah limbah/sisa panen tanaman pertanian dan sampah organik kota atau sampah organik dapur. Limbah panen diperkecil ukurannya sekitar 5 – 10 cm, sedangkan sampah kota atau sampah dapur dipilah antara sampah organik (sayuran, daun-daunan, kertas) dan sampah anorganik (plastik, logam dll).

Cacing yang digunakan dalam proses pembuatan vermicompos diantaranya *Brandling-worms* (*Esenia foetida*), *Redworms* (cacing merah) (*Lumbricus rubellus*). Cacing-cacing ini jarang ditemukan di dalam tanah tapi dapat menyesuaikan dengan kondisi tertentu dalam pergiliran tanaman. Kotak untuk pembuatan vermicompos sangat bervariasi, tergantung keinginan dan keperluan pembuat kompos.

5.3.2. Model-model pengomposan



Gambar 26. Ember atau kotak (bersekat) tempat pengomposan skala kecil untuk sampah rumah tangga, ember/kotak dibagi dua dengan kawat ayam, bagian dasar diisi tanah 5 cm, bahan organik diisikan dari atas kotak ke sebelah bagian (kanan) dari kotak, setelah bahan organik turun setengahnya bahan organik diisikan lagi ke sebelah bagian (kiri) lainnya, demikian seterusnya bolak-balik. Kotak ditutup dengan kain blacu hitam. Panen vermicompos diambil dari atas

A. Skala kecil

Pembuatan vermicompos dalam skala kecil, menggunakan kotak yang sangat beragam. Terbuat dari papan kayu atau kotak plastik yang sudah tidak terpakai. Beberapa jenis bahan kurang dianjurkan seperti styrofoam, logam; styrofoam

dipercaya mengeluarkan racun ke dalam lingkungan hidup cacing, sedangkan logam menyerap panas, mudah berkarat dan mengeluarkan logam berat ke dalam vermicompos.

Bentuk kotak pembuatan vermicompos skala kecil disesuaikan dengan tempat tersedia dimana kotak akan ditempatkan dan cara memberikan makanan cacing. Kotak bisa diganti dengan ember, dengan volume disesuaikan dengan tempat yang tersedia. Secara umum kotak mempunyai lubang ventilasi untuk pertukaran udara disamping untuk pengeluaran drainase air, salah satunya di bawah kotak sebagai tempat pengeluaran air yang dapat ditampung dalam nampan atau berupa kran yang dapat dibuka dan ditutup untuk mengatur drainase. Kotak (wadah plastik) umumnya lebih banyak mengeluarkan air (drainase) karena tidak menyerap air dibanding kotak yang dibuat dari kayu. Model kotak pengomposan yang dianjurkan untuk membuat kotak terutama untuk skala kecil dibagi menurut tiga kelompok yaitu:

Kotak tidak bersekat – Tempat pembuatan vermicompost yang tidak bersekat. Alas ditempatkan pada bagian dasar, cacing dan bahan organik disimpan di atasnya. Alas berikutnya ditempatkan di atas bahan organik, kemudian cacing akan mengomposkan bahan organik dan alas tersebut. Tipe kotak ini sering digunakan karena berukuran kecil dan mudah dibuat. Namun mempunyai kesulitan saat memanen kompos karena cacing dan material kompos harus dikeluarkan semua dari kotak.

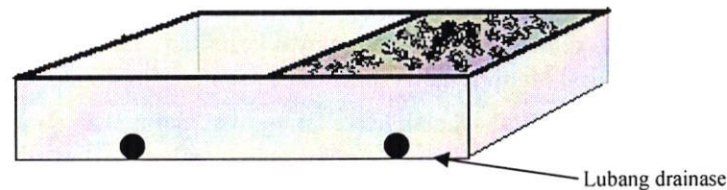
Kotak bersekat vertikal - Kotak bersekat vertikal merupakan nampan-nampan yang disusun berseri secara vertikal. Nampan paling bawah paling duluan diisi bahan organik. Apabila bahan masih penuh mencirikan bahan belum matang, kompos belum bisa dipanen. Apabila bahan organik sudah menipis mencirikan kompos sudah bisa dipanen kemudian dipasang (dihamparkan) di atasnya alas sejenis yang mirip pada nampan dibawahnya, kemudian diisikan bahan organik yang baru di atasnya. Tujuannya agar sebagian cacing bermigrasi ke lapisan nampan di atasnya. Apabila diperkirakan sebagian cacing yang bermigrasi sudah cukup, kompos di bawah bisa dipanen dan cacing yang terbawa saat panen, merupakan cacing bebas yang bisa dipakai bibit pada kotak pengomposan lainnya. Kotak semacam ini lebih memudahkan saat panen.

Kotak bersekat horizontal - Kotak bersekat horizontal merupakan model nampan yang saling bersandaran (berdampingan) untuk memberi kesempatan kebiasaan cacing tanah bermigrasi mencari sumber makanan pada kotak disampingnya, dibuat untuk memudahkan proses panen kompos. Kotak bersekat horizontal dibuat seperti kotak tidak bersekat, hanya ukurannya dua kali lebih panjang. Kotak dibagi dua ke arah panjang dan dibatasi oleh kawat ayam. Permulaannya hanya sebelah yang diisi, ketika sudah tinggal setengahnya kotak sebelah lainnya diisi bahan organik yang baru (mentah). Pada saat migrasi cacing ke kotak sebelah lainnya untuk mencari sumber makanan yang baru telah dianggap cukup, kompos yang sudah matang beserta cacing

yang masih tertinggal bisa dipanen. Kotak model ini sedikit lebih panjang dari model kotak tidak bersekat, namun masih cukup kecil untuk diletakkan di dalam rumah, dengan memudahkan panen kompos cacing (vermikompos).

B. Skala luas

Sebagian besar proses pembuatan vermikompos skala besar sejatinya tidak dimasukkan dalam kotak secara fisik sekaligus, karena dalam prakteknya tidak mudah. Dalam sistem yang luas umumnya digunakan tempat terbuka. Tempat tersebut mudahnya adalah terdiri atas hamparan bahan organik untuk cacing tanah tinggal dan layaknya kotak cacing yang besar: bahan organik dihamparkan lalu cacing melakukan pengomposan dengan memakan bahan organik tersebut. Hamparan ini tidak membatasi cacing untuk tetap tinggal dan meloloskan diri, namun secara teori cacing tersebut tidak akan meninggalkan tempat tersebut karena melimpahnya bahan makanan bagi cacing. Sering juga hamparan bahan organik ini permukaan alasnya diperkeras dengan beton untuk mencegah predator memakan populasi cacing tanah.



Gambar 27. Bak pengomposan skala besar, lebar 3 – 5 m, panjang 6 – 10 m, tinggi 0,6 m, diisi tanah 10 cm, bahan organik diisikan bergantian kiri-kanan melalui bagian atas, cacing dimasukkan sebelum diisi bahan organik, bak ditutup polibag

5.3.3. Pemeliharaan

A. Memulai proses

Pada saat proses dimulai pembuatan kompos, cacing tanah dekomposer dimasukkan ke dalam kotak sebanyak-banyaknya yang tersedia. Sejumlah limbah dapur yang sesuai untuk cacing bisa ditambahkan ke dalam kotak prosesing setiap hari atau mingguan. Pada permulaannya makanan cacing diberikan maksimum setengah berat badan cacing, yang berasal dari sisa-sisa sampah dapur. Setelah mandiri (dewasa) bisa diberikan makanan sesuai berat badannya.

B. Bahan organik (*bedding*)

Bahan organik dalam kotak merupakan tempat tinggal sekaligus sumber makanan bagi cacing, merupakan bahan material yang mengandung karbon dan dibuat menyerupai serasah dilantai hutan, yang merupakan habitat alami cacing tanah. Bahan organik diperlukan agar tetap lembab dengan struktur lepas untuk memudahkan cacing bernafas dan sebagai sarana proses dekomposisi aerobik. Berbagai jenis bahan organik dapat digunakan sebagai bahan kompos cacing meliputi: kertas koran, serbuk gergaji, jerami, kardus, gambut, bahan-bahan lapuk, dan daun kering. Sebagian besar cacing dekomposer dihindarkan dari kertas mengkilat yang berasal dari koran, dan majalah, kiriman surat rombongan, cabikan dari kantor, karena kemungkinan mengandung racun yang akan berpengaruh terhadap sistem pengomposan. Juga kertas karton tidak dapat digunakan jika mengandung lilin atau plastik, seperti kotak benih, dan kotak-kotak lainnya yang digunakan untuk membungkus barang makanan. Untuk mempercepat proses pengomposan, sebaiknya bahan organik dicampur dengan kotoran ternak ruminansia yang sudah matang, sekadar untuk memancing mikroorganisme untuk ikut berperan dalam proses dekomposisi bersama cacing tanah. Bahan organik segar sebaiknya dilayukan terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam kotak.

C. Suhu

Cacing yang digunakan dalam proses pengomposan lebih suka hidup pada temperatur 12- 21°C, dan suhu bahan organik yang dikomposkan sebaiknya tidak dibawah 0°C dan tidak diatas 29°C, untuk cacing *Pheretima hupiensis*, suhu media yang dikehendaki sekitar 28°C, pada suhu 30°C, kokon menetas, dan pada suhu 32°C anak cacing mati.

D. Limbah dapur

Hijauan: Jika terlalu banyak limbah dapur ditambahkan untuk diproses cacing-cacing, limbah akan menjadi busuk. Perbandingan "bahan hijauan" seperti sisa makanan dan "bahan coklatan" seperti sobekan kertas koran untuk dikomposkan harus diatur. Perbandingan hendaknya satu bagian "bahan hijauan" dengan dua bagian "bahan coklatan". Menutupi bahan sisa-sisa makanan dengan lapisan sobekan-sobekan kertas koran (bahan coklatan), dapat mengurangi penyebaran bau busuk dan gangguan alat dan insek. Hindarkan potongan-potongan rumput atau sisa tanaman yang telah disemprot dengan pestisida ke dalam bahan yang dikomposkan. Di dalam kotak skala kecil kulit pisang yang disemprot dengan pestisida dapat membunuh semua cacing yang ada.

Daging-dagingan: walaupun protein seperti lemak dan daging dapat diproses dengan memakai kotak, menyebabkan cenderung akan menarik binatang pemakan daging, dan hendaknya dihindarkan dari risiko ini. Cacing tidak dapat mengurai tulang dan bahan sintesis.

Dalam jangka panjang, pemeliharaan harus dijaga untuk menjaga tingkat kelembapan dan keseimbangan pH. Di dalam kotak tidak bersekat, akibat buruk dari cairan yang terbentuk, dapat dikeluarkan (dialirkan) dengan sebuah kran dan dapat digunakan sebagai pupuk bagi tanaman. Bagi kotak bersekat, tidak akan dapat menahan cairan yang dihasilkan dan dibutuhkan penambahan air untuk memelihara kelembapan bahan kompos. Terlalu banyak kulit jeruk di dalam bahan yang dikomposkan dapat meningkatkan kemasaman yang berlebihan, tapi ini kadang-kadang dapat dikurangi dengan penambahan segenggam kapur.

Cacing sebagaimana mikroorganisme lainnya di dalam proses pengomposan membutuhkan oksigen, oleh karena itu kotak harus dibuat "sarang", sehingga udara dapat dengan mudah masuk ke dalam bahan kompos. Ini dapat disiasati dengan membalik bahan kompos secara teratur, menambah lubang-lubang di kotak pengomposan, atau menggunakan kotak bersekat, jika tidak cukup oksigen tersedia, kompos akan menjadi anaerobic. Hal ini akan menimbulkan proses pembusukan yang menimbulkan bau busuk yang sangat mengganggu manusia. Pembusukan seperti ini dapat diketemukan dilingkungan rawa-rawa dan lumpur yang menimbulkan bau busuk atau amis.

E. Cara pemberian makan

Pada dasarnya terdapat dua metode dalam menambahkan bahan ke dalam kotak.

Metode pertama: yaitu metode pemberian melalui bagian atas kotak, yaitu pemberian bahan organik secara langsung diberikan pada lapisan bagian atas kotak, kemudian ditutup dengan lapisan lainnya dari bahan organik. Ini diulangi setiap waktu pada saat kotak diisi.

Metode pemberian makan lainnya disebut juga sebagai sistem ransom (*pocket feeding*). Metode ini bagian lapisan atas bahan organik di atur dan makanan dikubur di bagian bawah. Lokasi makanan (bahan organik) di tukar-tukar setiap saat pemberian dan sering kotak pemberian makan lebih dari satu lokasi. Pembuat vermikompos sering menggabungkan kedua metode ini. Kadang-kadang sisa-sisa makanan yang tidak terkubur menarik lalat buah.

F. Masalah-masalah

Bau busuk: Hal ini terjadi umumnya disebabkan terlalu banyak hijauan di dalam kotak, terutama terlalu banyak nitrogen yang bercampur dengan hidrogen dan membentuk amoniak. Untuk menetralkannya bau-bau ini, hendaknya ditambahkan sejumlah bahan karbon lalu dicampur. Karbon tersebut akan menyerap nitrogen dan membentuk campuran yang tidak berbau. Kertas dan daun kering merupakan sumber karbon yang bagus. Penambahan karbon terlalu banyak menyebabkan proses dekomposisi lambat.

Hama-sejenis bahan organik tetentu dalam hal ini seperti baunya- dapat menarik hama seperti tikus dan lalat. Hal ini terjadi apabila terlalu banyak limbah dapur terutama daging. Masalah ini bisa ditanggulangi apabila digunakan skala kotak yang dapat menutupi bahan organik dengan rapat dan dibuat dari bahan yang tidak disukai oleh tikus.

Sebagai catatan cacing merah bukan asli berasal dari Amerika Utara, mereka merupakan spesies invasive dan bisa menyesuaikan diri di berbagai belahan dunia. Jangan membuang kompos berisi cacing merah, bisa menyebabkan tersingkirnya cacing-cacing setempat.

5.4. Keuntungan Vermikompos

Proses dekomposisi dalam kondisi alami sejatinya terjadi oleh mikroba maupun makro fauna. Semua biota tanah terintegrasi dan masing-masing berperan dalam proses dekomposisi bahan organik yang berada di alam, sehingga terjadi keseimbangan antara ketersediaan bahan organik sebagai sumber energi bagi biota tanah dengan kebutuhan untuk kehidupan dan pertumbuhan tubuhnya (metabolisme). Apabila proses dekomposisi bahan organik tanah terlalu cepat maka terjadi degradasi bahan organik dalam tanah, dan tanah akan cepat kekurangan bahan organik. Sebaliknya apabila proses dekomposisi bahan organik terlalu lambat, maka akan terjadi immobilisasi hara dalam tanah, terjadi penimbunan bahan organik di dalam tanah dan akan terakumulasi di permukaan tanah yang akan menjadi cemaran bagi lingkungan (Lavelle *et al.*, 1992 dan Scheu, 1991). Dekomposisi oleh cacing tanah bersama mikroba lainnya, merupakan proses dekomposisi yang seimbang. Hasil penelitian menunjukkan pada bahan yang mudah terdekomposisi seperti sampah dapur, proses dekomposisi oleh mikroba saja, memerlukan hara yang lebih banyak untuk metabolisme dan mendepositkan sebagian kecil hara ke dalam vermikompos, demikian juga dekomposisi oleh cacing tanah saja, pada bahan organik yang mudah terdekomposisi maupun yang agak sulit terdekomposisi, hara yang didepositkan ke vermikompos hanya sebagian kecil, sebagian besar digunakan untuk hidup dan pertumbuhan tubuh cacing, walaupun hara dalam tubuh cacing akan dikembalikan ke dalam tanah apabila cacing tanah mati dan merupakan hara tersedia bagi tanaman. Pada proses dekomposisi oleh mikroba dan cacing tanah, cacing tanah juga memakan fungi dan bakteri sehingga proses dekomposisi berkurang kecepatannya terutama pada bahan organik yang mudah terdekomposisi oleh mikroba seperti bahan organik sayuran (Tabel 9).

Vermikompos sesuatu yang kaya hara, sebagai pupuk alami dan sebagai *soil conditioner* (pembenah tanah) (Tabel 10), terlalu sayang digunakan untuk pertanian, tapi sangat bermanfaat sebagai lapisan penutup tanah atau ditambahkan ke dalam pot bunga. Dilaporkan beberapa model penanaman dalam lubang, biji (benih) mudah berkecambah apabila diletakkan di atas vermikompos.

Tabel 9. Jenis-jenis hara yang terdepositkan dalam proses dekomposisi beberapa bahan organik

Dekomposer	Bahan organik	Deposit hara	
		Metabolisme	Vermikompos
Mikroba	Jerami	C, Fe, Al	N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn
	Tangkos kelapa sawit	C, Fe, Al	N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn
	Sampah pasar	C, N, K, Ca, Mg, S, Fe, Al, Mn, Cu, Zn	
	Jerami	C, N, P, Ca, Mg, Fe, Al, Cu, Zn	K, S, Mn
Cacing (<i>Lumbricus</i> sp)	Tangkos kelapa sawit	N, P, Ca, Mg, S, Fe, Al, Mn, Cu, Zn	C, K
	Sampah pasar	C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Al, Mn, Cu, Zn	
	Jerami	C, K, Fe, Al	N, P, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn
Cacing + mikroba	Tangkos kelapa sawit	C, K, Fe, Al	N, Ca, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn
	Sampah pasar	C, N, S, Fe, Al	P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn

(Sumber: Anwar, 2009)

Tabel 10. Kandungan hara vermikompos hasil dekomposisi *Lumbricus rubellus* terhadap sumber bahan organik jerami, tangkos dan sampah pasar

Parameter/Hara	Sumber bahan organik		
	Jerami	Tankos	Sampah pasar
C (%)	17,8	16,5	14,1
N (%)	1,18	0,98	1,03
C/N (%)	15,6	17,0	13,8
P (%)	0,51	0,65	0,52
K (%)	0,56	1,04	1,44
Ca (%)	1,57	1,58	1,55
Mg (%)	0,25	0,37	0,29
S (%)	0,21	0,27	0,25
Fe (ppm)	0,22	3,3	1,8
Al (ppm)	2,5	3,2	1,7
Mn (ppm)	980	1.351,9	1.324,4
Cu (ppm)	29,4	42,2	27,9
Zn (ppm)	141,8	194,4	149

Sumber: Balai Penelitian Tanah, 2004

Keuntungan penggunaan vermikompos bagi tanah melalui tiga cara:

- Memperbaiki struktur fisik tanah (Tabel 11)
- Memperbaiki sifat tanah (memperkaya mikroorganisme, menambah hormon pertumbuhan, seperti auxin, asam gibrellic dsb.

Tabel 11. Pengaruh pemberian cacing tanah *Pheretima hupiensis* terhadap sifat fisik tanah (Balai Penelitian Tanah, 2004)

Perlakuan	Ruang pori total	Bulk Density	Pori drainase cepat	Pori drainase lambat	Permeabilitas
	% vol	g/cc	— % vol	—	m/jam
Tanpa inokulasi cacing					
Rata-rata	72,6	0,75	32,4	4,4	12,4
Dengan inokulasi cacing					
Rata-rata	74,9	0,67	37,4	4,6	17,0

- Dengan kehadiran cacing-cacing di dalam tanah dapat membuat lubang yang dalam di dalam tanah. Jika dalam 1 acre tanah tinggal 500.000 ekor cacing tanah akan dapat membuat 50 t kastings, setara dengan isi 100.000 kaleng kopi isi 1 pon dapat terisi penuh dengan kastings, ini berarti 500.000 ekor cacing tanah dalam 1 acre tanah dapat membuat lubang drainase setara pipa dengan panjang 2.000 kaki diameter 6 inci (McCredie *et al.*, 1992 dan Witt, 2004).

5.5. Hama dan Penyakit Cacing Tanah

5.5.1. Hama cacing tanah

Hama cacing tanah selain sebagai pengganggu juga sebagai kompetitor. Kompetitor (pesaing) dalam hal makanan dan tempat tinggal (lingkungan). Sedangkan pemangsa merupakan predator yang memakan cacing tanah sebagai makanannya. Hama ini bisa menyerang cacing tanah yang berada pada kotak pemeliharaan (perbanyakkan) maupun pada proses pengomposan.

Hama dan pemangsa yang biasa menyerang cacing tanah pada kotak pemeliharaan maupun pada proses pengomposan antara lain:

- Tikus
- Semut
- Unggas
- Kelabang
- Tungau (kutu)
- Katak/Bangkong
- Kumbang

5.5.2. Penyakit cacing tanah

Beberapa jamur tanah yang tumbuh pada media perbanyakan cacing tanah yang berasal dari kotoran hewan ternak dan menimbulkan bau busuk menyebabkan cacing tanah tidak suka dan keluar dari media. Kekeringan juga menyebabkan cacing lari dari media perbanyakan, (bau) minyak tanah, oli dsb. menyebabkan cacing tanah lari dari media. Pencegahannya dengan cara sebelum cacing tanah dimasukkan ke dalam media untuk diperbanyak/dipelihara, media dibiarkan dulu sampai bau busuknya habis, dan dijaga media tetap lembab sesuai yang diinginkan cacing.

Pencegahan dan pemeliharaan

Untuk mencegah serangan tikus terhadap cacing tanah yang berada pada nampan-nampan pemeliharaan/perbanyakan maupun dalam nampan pengomposan, nampan cukup ditutup dengan kain blacu hitam, lalu kain blacu dikuatkan dengan diikat karet atau tali rafia, sedangkan pada kotak atau bak pengomposan, untuk mencegah dari serangan tikus, kotak atau bak pengomposan ditutup dengan plastik polibag hitam.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, E.K. 2009. Efektivitas cacing tanah *Pheretima hupiensis*, *Eudrellus sp.* dan *Lumbricus sp.* dalam proses dekomposisi bahan organik. Jurnal Tanah Tropika Vol. 14-2 Mei 2009. Jurusan Ilmu Tanah Fak. Pertanian Univ. Lampung dan HITI Komda Lampung.
- Balai Penelitian Tanah. 2004. Teknik Perbanyakan Cacing Tanah *Pheretima hupiensis*. Laporan Hasil Penelitian Tanah. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- Blanchette R.A. 1995. Degradation of lignocelluloses complex in wood. Can. J. Bot. 73 (Suppl. 1): S999-S1.010.
- Blanchette R.A., K.R. Cease, and A.R. Abad. 1991. An evaluation of different forms of deterioration found in archaeological wood. Int. Biodeter. 28: 3-22.
- Boyle C.D., B.R. Kropp, and I.D. Reid. 1992. Solubilization and mineralization of lignin by white rot fungi. Appl. Environ. Microbiol. 58: 3.217-3.224.
- Burgess, H. D. 2008. *Relationships Between Colour Production in Cellulose and the Chemical Changes Brought About by Bleaching*. Conservation Processes Research Canadian Conservation Institute. Ottawa- Canada.
- Butler, T.A, L.J. Sikora, P.M. Steinhilber, and L.W. Douglass. 2001. Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. J. Environ. Qual. 30: 2.141-2.146.
- Chahal, P.S. dan D.S. Chahal. 1998. Lignocellulosic waste: biological conversion. pp. 376-422 In Martin, A.M. [Eds.]. Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products. Ed ke-2. London: Blackie Academic & Professional.
- Edwards, C.A. and Lofty. 1977. Biology of Earthworms A Halsted Press Boo. JohnWiley & Sons, New York. 333 pp.
- FAO. 1977. Cina: Recycling of organic wastes in agricultures. Soil Bull. 40.
- FAO. 2003. On-farm Composting Methods. Food and Agriculture Organization. Rome.
- Gandjar, Indrawati, Wellyzar Sjamsuridzal dan Ariyanti Oetari. 2006. Mikologi Dasar dan Terapan. Yayasan Obor Indonesia. Jakarta.
- Gaur, A.C. 1982. A Manual of Rural Composting. In Improving Soil Fertility Through Organic Recycling. Project Field Document No. 15. FAO, Rome.
- Geib, Scoot M et al. 2008. *Lignin Degradation in Wood-Feeding Insect*. Department of Entomology and center for Chemical Ecology. Pennsylvania.
- Hawksworth, D.L. 1991. The fungal dimension biodiversity: magnitude, significance, and conservation. Mycological Research 95 (6): 641 – 655.
- Hendriksen, N.B. 1990. Leaf Litter Selection by Detritivor Geophagous Earthworms. Biol. Fertil. Soils 10: 17 - 21.
- Herman's Adventure. www.urbanext.uiuc.edu/worms. 6 Sept 2004
- Hill. B.S. 2004. Soil fauna and agriculture : Past findings and future priorities. EAP Pub. 25. 8pgs. <http://eap.mcgill.ca/Publications/eap-head.htm> (21-4-2007).
- Irawadi, T.T. 1990. Selulase. DIKTAT. Pusat Antar Universitas Bioteknologi. Institut Pertanian Bogor.
- Lake, E. and S. Supak 1996. What's the deal with yucky old worms? pp. 1-2. In Sierra Pelona Press.
- Listyawan B., Aprianto, D.A. Siddik, Z. Badruzzaman, dan Sudrajat. 1998. Teknologi VAP-BL. PT Vermi Alam Prima Lestari. Jl. Babakan Jeruk II No. 11 Bandung, Indonesia.
- Lynd, L.R, P.J. Weimer, W.H. Van Zyl, and I.S. Pretorius. 2002. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and Biotechnology. p 5 02-577 In. .Microbiology and Molecular Biology Review.
- McCredie, T.A, C.A.Parker, and I. Abbott. 1992. Population dynamic of The Earthworm *Aporrectodea tropezoides* (Annelida : Lumbricidae) in Western Australia Pasture Soil. Biol. Fertil. Soils 12: 285 - 289.

- Morarka M.R. 2005. GDC Rural Research Foundation. Vermiculture. Nemicast specifications. Physical, Chemical & Biological Specifications. RIICO Gem Stone Park. Tonk Road, Jaipur-302011, Rajasthan (India).
- Munir, E. 2006. Pemanfaatan Mikroba dalam Bioremediasi: Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan. Pidato Pengukuhan sebagai Guru Besar Tetap dalam Bidang Mikrobiologi, FMIPA, Universitas Sumatera Utara. Medan, 1 Mei 1006.
- Orth A.B., D.J. Royse, M. Tien. 1993. Ubiquity of lignin-degrading peroxidases among various wood-degrading fungi. *Appl Environ Microbiol* 59:4.017-4.023.
- Parmelee, R.W., M.H. Beare, W. Cheng, P.F. Hendrix, S.J. Rider, D.A. Crossley Jr.; and D.C. Coleman. 1990. Earthworm and *Enchytraeids* in Conventional and No-tillage Agroecosystems: A Biocide Approach to Assess Their Role in Organic Matter Breakdown. *Biol.Fertil.Soils* 10: 1-10. London and New York.
- Rao, N.S. 1982. Advance in agricultural microbiology. Oxford & IBH Pub. Co. New Delhi, Bombay, Calcuta.
- Rao, N.S. Subba. 1994. Mikroorganisme Tanah dan Pertumbuhan Tanaman. Ed-2. Herawati Susilo, penerjemah. Jakarta : Universitas Indonesia Press. Terjemahan dari: Soil Microorganism and Plant Growth.
- Scheu, S. 1991. Mucus excretion and carbon turnover of *Endogeic Earthworms*. *Biol. Fertil. Soils* 12: 217 - 220.
- Schwert, D.P. 1990. *Oligochaeta: Lumbricidae*. p. 341-356. In D.L. Dindal (Ed.), Soil Biology Guide. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons. New York.
- Subowo. 2002. Pemanfaatan Cacing Tanah (*Pheretima hupiensis*) untuk Meningkatkan Produktivitas *Ultisol* Lahan Kering. Disertasi. Program Pasca Sarjana IPB, Bogor. 94 hlm.
- Sudiarto, 1996. Materi Diklat Budi daya Cacing Tanah .Unpublish.
- Tim Peneliti Kompos. 1991. Penelitian dan pengembangan pupuk kompos sampah kota. Kerjasama Center for Policy and Implementation Studies dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian, Deptan. <http://id.wikipedia.org/wiki/kompos>. Desember 2009
- Vähätalo A.V., K. Salonen, M. Salkinoja-Salonen, and A. Hatakka. 1999. Photochemical mineralization of synthetic lignin in lake water indicates rapid turnover of aromatic organic matter under solar radiation. *Biodegradation* 10: 415-420.
- Wagner GH and DC. Wolf. 1998. Carbon transformations, and soil organic matter formation. p: 218-256. In M Sylvia, JF. Fuhrmann, PG. Hartel, and DA. Zuberer (Eds.). Prentice Hall, Inc.USA.
- Wikipedia. 2008. Lignin. Jakarta. <http://id.wikipedia.org/wiki>.
- Witt, B. 2004. Using Soil Fauna to improve soil health. Available online at <http://www.hort.agri.umn.edu/h5015/97papers/wit.html>, Juli 2006.
- Witt, B. 2004. Using soil fauna to improve soil health. <http://www.hort.agri.umn.edu/h5015/97papers/witt.html> (21-4-2007).
- Zibilske, L.M. 1998. Composting of organic wastes. p 482-497. In D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel, & D.A Zuberer (Eds.) Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall. New Jersey.

Lampiran 1. Media Isolasi dan Seleksi

Media Isolasi Basidiomisetes

Malt extract	15 g	Dichloran	2 mg
Agar	18 g	Akuades	1.000 ml
Benomyl	2 mg		

Tambahkan antibiotik setelah autoklaf. Penyiapan larutan stok antifungi, tambahkan 40 mg benomyl ke dalam etanol 95%, encerkan etanol menjadi 100 ml dengan akuades hangat, dan tambahkan 20 mg dichloran. Taruh larutan stok dalam refrigerator. Tambahkan 10 ml larutan stok antifungi ke dalam 1 l medium sebelum atau setelah autoklaf. Medium dapat digunakan untuk isolasi basidiomisetes dari kayu yang membusuk, jaringan basidiomimata, utas-utas hifa, dan rhizomorf.

Potato Dextrose Agar (PDA)

Kentang	200 g	Agar	20 g
Glukosa	20 g	Akuades	1.000 ml

Potong-potong kentang dan masukan ke dalam air. Autoklaf 20 menit pada 15 psi. Saring dan peras sampai cairan kentang terekstraksi. Tambahkan akuades sampai 1 l. Tambahkan glukosa dan agar lalu autoklaf selama 15-20 menit pada 15 psi.

Carboxymethyl Cellulose Agar untuk Fungi

Sodium carboxymethyl cellulose	10,0 g	CaCl ₂	0,05 g
Ekstrak khamir	0,50 g	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,010 g
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,00 g	CuSO ₄	0,010 g
NaNO ₃	2,00 g	MnSO ₄ ·4H ₂ O	0,005 g
KH ₂ PO ₄	1,00 g	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,001 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,50 g	Agar	15 g
KCl	0,50 g	Akuades	1000 ml

Untuk mudahnya, 5 garam terakhir dapat dikombinasikan sebagai satu larutan stok. Sodium carboxymethyl cellulose membentuk gel yang sangat tidak larut, tetapi beberapa merk mudah larut. Campurkan semua bahan dalam erlenmeyer, tambahkan perlahan-lahan air panas, sambil terus diaduk. Biarkan pengadukan selama 15-30 menit. Medium kemungkinan membentuk gumpalan; sebagian besar gumpalan dapat terdispersi setelah diautoklaf. Tambahkan antibakteri setelah autoklaf. Medium dapat digunakan untuk isolasi fungi dari tanah dan serasah.

Alkali lignin

KH ₂ PO ₄	0,5 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,2 g	KOH 1 M	5 ml
NH ₄ NO ₃	0,1 g	Guaiakol	0,4 ml
KCl	0,1 g	Indulin AT (alkali lignin)	1 g
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,02 g	Clortetracycline-HCl	60 mg
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0,05 g	Streptomisin sulfat	30 mg
Malt ekstrak	2 g	Penicilin G	30 mg
Agar	15 g	Benomyl	4 mg

Autoklaf medium basal bersama batang pengocok magnetik dalam Erlenmeyer, lalu ketika suhu media ± 55°C, tambahkan bahan-bahan sebagai berikut: 5 ml larutan KOH 1 M; 0,4 ml guaiakol; 1 g indulin AT (alkali lignin) yang disiapkan dengan cara melarutkan dalam 10 ml dioksan; 60 mg antibiotik *Clortetracycline-HCl*; 30 mg streptomisin sulfat; 30 mg penisilin G; dan 4 mg benomil (seperti benlate 50 WP), lalu kocok dan tuang ke dalam cawan Petri.

Medium Isolasi Cytophaga

Na ₂ EDTA	5 mg	(NH ₄) ₂ SO ₄	1 g
FeSO ₄ ·7H ₂ O	2 mg	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,2 g
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,1 mg	CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,1 g
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0,03 mg	K ₂ HPO ₄	1 g
H ₃ BO ₃	0,3 mg	Sodium carboxymethyl cellulose	10,0 g
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,2 mg	Agar	15 g
CuCl ₂ ·2H ₂ O	0,01 mg	Akuades	1000 ml
NiCl ₂ ·6H ₂ O	0,2 mg	pH	7,4
NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0,03 mg		

Humic Acid-Vitamin agar media (HV agar)

Humic acid	1 g*	Vitamin	**
CaCO ₃	0,02 g	Cyclohexamide	50 mg
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,01 g	Agar	18 g
KCl	1,71 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,05 g	pH	7,2
Na ₂ HPO ₄	0,5 g		

*Larutkan dalam 40 ml NaOH 0,4%, 100°C, 30 menit.

**0,5 mg masing-masing thiamine-HCl, riboflavin, niacin, piridoxin-HCl, inositol, Ca-pantothenat, p-aminobenzoat acid dan 0,25 mg biotin. Vitamin distrerilisasi dengan penyaringan menggunakan milipore 0,2 M.

Carboxymethyl Cellulose Agar untuk Aktinomisetes

(NH ₄) ₂ SO ₄	1,00 g	Ekstrak khamir	1,0 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	1,00 g	Sodium carboxymethyl cellulose	10,0 g
MnSO ₄	0,01 g	Agar	20,0 g
FeCl ₃	0,01 g	Akuades	1000 ml
Glukosa	0,10 g	pH	6,8 – 7,5

Media Dubos

NaNO ₃	0,5 g	KCl	0,5 g
K ₂ HPO ₄	1,0 g	FeSO ₄ .7H ₂ O	0,01 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,5 g	Akuades	1000 ml

Rose Bengal Agar Martin

Glukosa	10,0 g	Streptomycin sulphate (lar. 10%)	3 ml
Pepton	5,0 g	Agar	15 g
KH ₂ PO ₄	1,0 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,05 g	Rose Bengal	33 mg

Cellulose-pepton agar (Allen,1953)

Selulosa	2,5 g	CaCl ₂	0,02 g
Pepton	0,5 g	Fe ₂ (SO ₄) ₃	0,02 g
K ₂ HPO ₄	0,2 g	NaCl	0,02 g
MgSO ₄	0,2 g	Akuades	1000 ml

Media Hans untuk isolasi bakteri selulolitik

K ₂ HPO ₄	0,5 g	NaCl	6,0 g
KH ₂ PO ₄	0,5 g	Ekstrak khamir	0,1 g
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,0 g	Selulosa/strip kertas filter	10,0 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,1 g	Akuades	1000 ml
CaCl ₂	0,1 g	pH	7,0

Media Asparagin untuk isolasi fungi selulolitik

(NH ₄) ₂ SO ₄	0,5 g	CaCl ₂	0,1 g
L-asparagin	0,5 g	Ekstrak khamir	0,5 g
K ₂ HPO ₄	1,0 g	Selulosa/strip kertas filter	10,0 g
KCl	0,5 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2 g	pH	6,2

Media Kenknight untuk isolasi aktinomisetes selulolitik

K ₂ HPO ₄	1,0 g	Selulosa/strip kertas filter	10,0 g
NaNO ₃	0,1 g	Akuades	1000 ml
KCl	0,1 g	pH	7,0-7,2
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,1 g		

Media Czapek

NaNO ₃	2,0 g	FeSO ₄ .7H ₂ O	0,01 g
KCl	0,5 g	Selulosa	10,0 g
K ₂ HPO ₄	1,0 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,5 g	pH	6,4-7,0

Media Mandel dan Reese (1957)

Proteose pepton	1,0 g	MnSO ₄ .H ₂ O	1,6 mg
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,4 g	ZnCl ₂	1,7 mg
KH ₂ PO ₄	2,0 g	Selulosa	10,0 g
Urea	0,3 g	Akuades	1000 ml
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,3 g	pH	5,3
CaCl ₂	0,3 g		

Media produksi selulase bakteri selulolitik (Dickermann dan Staff, 1951)

K ₂ HPO ₄	0,8 g	NaNO ₃	0,1 g
KH ₂ PO ₄	0,2 g	Ekstrak khamir	0,01 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2 g	Selulosa	20,0 g
NaCl	0,2 g	Akuades	1000 ml

Lampiran 2. Media Produksi Mikroba Dekomposer

Potato Dextrose Agar (PDA)

Bahan	Jumlah
Kentang	200 g
Dextrose*	20 g
Akuades	1000 ml
Agar	20 g

*Bisa diganti gula pasir atau molase

King's B

Bahan	Jumlah
Protease pepton	20,0 g
Gliserol	15 ml
KH ₂ PO ₄	1,5 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	1,5 g
Akuades	1000 ml

Yeast extract-malt extract agar medium (ISP 2)

Bahan	Jumlah
Ekstrak khamir	4,0 g
Ekstrak malt	10,0 g
Dextrose	4,0 g
Akuades	1000 ml
Agar	20 g
pH	

Potong-potong kentang dan masukan ke dalam air. Autoklaf 20 menit pada 15 psi. Saring dan peras sampai cairan kentang terekstraksi. Tambahkan akuades sampai 1 l. Tambahkan glukosa dan agar lalu autoklaf selama 15-20 menit pada 15 psi.

631
T

ISBN 978-602-8039-20-8