

## INTERAKSI BIOLOGI NITROGEN DALAM TANAH

Oleh :

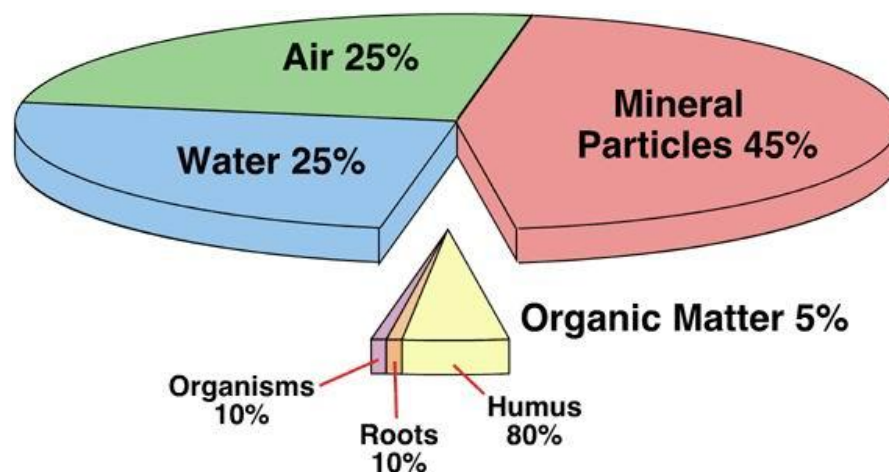
GUNAWAN BUDIYANTO

Agroteknologi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

### I. PENDAHULUAN

Dalam proses panjang produksi pertanian, tanah memegang posisi sentral karena perannya sebagai medium tumbuh tanaman. Oleh karenanya, atas dasar alasan inilah pada kebanyakan program peningkatan produksi tanaman pangan selalu tidak dapat dipisahkan dari program – program peningkatan produktivitas tanah.

Berdasarkan bahan induknya tanah dibagi menjadi tanah mineral (an-organik) yang bahan induknya berasal dari proses pelapukan batuan dan tanah organik yang bahan induknya berasal dari proses sedimentasi bahan organik atau dapat berasal dari tanah mineral dengan kandungan bahan organik lebih besar 50% dari volume tanahnya atau lebih besar dari 20% berat tanah. Brady (1990) menyatakan bahwa tanah mineral terdiri dari 4 komponen utama yaitu bahan mineral (bahan an-organik), bahan organik, air dan udara, sebagaimana disajikan dalam ragaan di bawah ini :



Gambar 1. Komponen utama tanah mineral.

Kondisi ideal komposisi penyusun tanah mineral tersebut terbagi atas dua bagian utama yaitu bagian padatan tanah (sekitar 45%), bagian ruang pori yang menempati kira-kira 50% volume tanah dan 5% bahan organik. Massa bahan organik terdiri atas 10% koloni jasad (organisme), 10% jaringan akar dan 80% fraksi humus. Walaupun jumlahnya relatif kecil jika dibanding dengan komponen penyusun tanah mineral lainnya, tetapi bahan organik memainkan peran paling lengkap dalam mempengaruhi produktivitas tanah, bahkan dalam pembahasan – pembahasan yang dihubungkan dengan keberlanjutan tanah sebagai lahan pertanian, posisinya sebagai satu-satunya pintu masuk energi matahari ke dalam tanah, menempatkan bahan organik sebagai titik sentral upaya – upaya mengembalikan kualitas tanah yang tidak terlepas dari ekosistem yang ada. Peningkatan kandungan bahan organik terutama massa organik segar selalu meningkatkan populasi jasad mikro dalam tanah. Aktivitas jasad mikro dalam memanfaatkan sumber energi dalam tanah telah lama diketahui dapat mempengaruhi status hara tanaman dan menciptakan interaksi biologi dalam tanah yang secara spesifik mempengaruhi setiap upaya peningkatan produktivitas tanah.

Beberapa dekade yang lalu, guna mengejar laju peningkatan kebutuhan bahan pangan, teknofarming secara dramatis telah dapat meningkatkan produksi pangan dunia, tetapi di akhir abad XX membuktikan bahwa rekayasa teknis dengan melibatkan sejumlah bahan kimia mendatangkan masalah lingkungan. Gore (1992) dan Postel (1994) *dalam* Doran dan Safley (1997) menyatakan bahwa memasuki abad XXI tantangan terbesar pemanfaatan teknologi adalah pengaruhnya terhadap lingkungan global dan tantangan untuk menjaga keberlangsungan kehidupan di atas bumi. Perubahan iklim global, tekanan terhadap lapisan ozon yang berfungsi sebagai pelindung, penurunan serius keragaman hayati, degradasi dan kehilangan lahan - lahan produktif akhirnya menjadi perhatian utama para pakar untuk kembali mempertimbangkan upaya – upaya yang lebih aman dan dapat diterima lingkungan. Masalah ini juga telah menjadi bahasan para pakar pertanian, sehingga kualitas lahan lebih banyak didekati dari segi kualitas sifat biologi tanah melalui konsep kesehatan tanah.

Pendekatan dari perspektif kesehatan tanah, tanah tidak lagi dipandang sebagai benda mati hasil bentukan alam yang merupakan hasil dari pelapukan batuan di

permukaan bumi, tetapi tanah dipandang sebagai suatu sistem yang dinamis yang didalamnya terdapat komponen abiotik dan biotik. Doran dan Safley (1997) lebih lengkap lagi menyatakan bahwa tanah merupakan tubuh alam yang dinamik dan hidup serta bersifat vital bagi ekosistem biosfer, serta menggambarkan keseimbangan unik antara faktor – faktor fisik, kimia dan biologi. Wolfe (2003) menyatakan bahwa masalah kesehatan tanah mulai menjadi perhatian petani setelah munculnya proses degradasi tanah akibat budidaya intensif, mekanisasi, terbatasnya rotasi tanaman serta keterbatasan penambahan bahan organik yang secara nyata menurunkan hasil tanaman, serta masalah ini akan memacu terjadinya pemadatan tanah, erosi, masalah besar hama dan penurunan produktivitas tanaman.

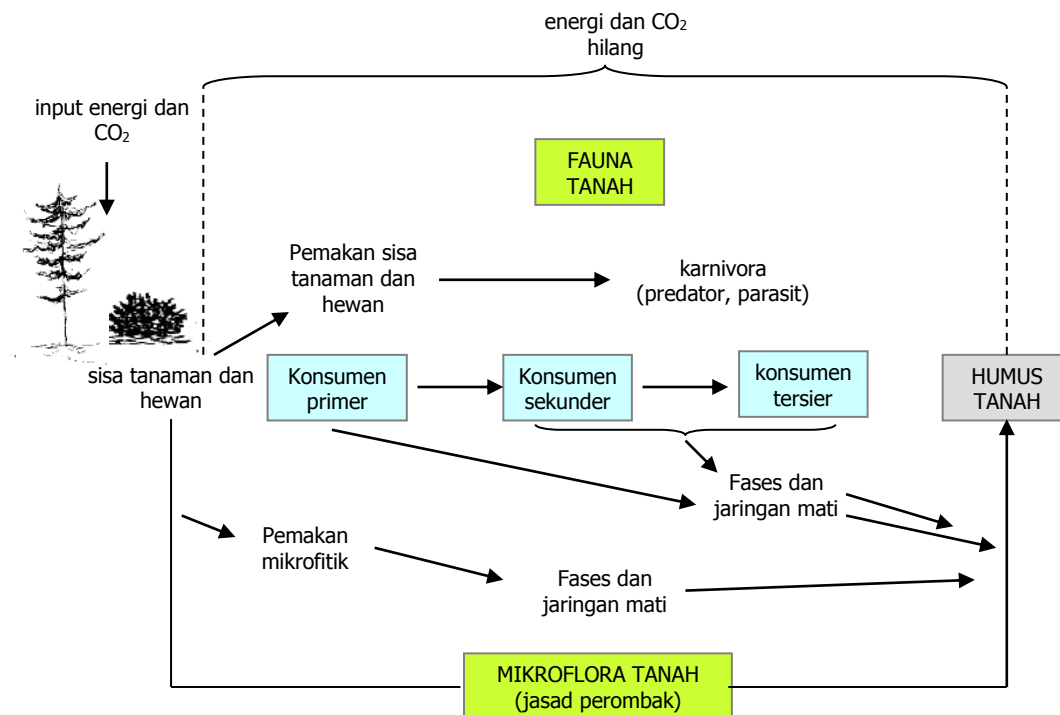
Konsep kesehatan tanah menurut Arias *et al.* (2005) mengacu kepada kondisi sifat – sifat biologi, kimia dan fisika yang diperlukan bagi produktivitas pertanian yang berkelanjutan dalam kurun waktu lama serta dengan dampak minimal bagi lingkungan. Dengan demikian kesehatan tanah menyediakan seluruh potensi tanah secara fungsional. Kesehatan tanah adalah sebuah sistem yang dapat memelihara berbagai macam komunitas jasad mikro di dalam tanah yang dapat mengontrol penyakit dan hama tanaman, memberikan keuntungan dari proses kerjasama simbiotik dengan akar tanaman, siklus hara tanaman, memperbaiki struktur tanah terutama kapasitasnya dalam mengikat air dan hara, dan meningkatkan produksi tanaman. Lebih lanjut Arias *et al.* (2005) menyatakan bahwa beberapa indikator hayati dapat digunakan untuk menentukan kesehatan tanah, yaitu antara lain, biomassa dan aktivitas jasad mikro, siklus karbon dan nitrogen, keragaman dan ketahanan jasad mikro, ketersediaan biologis senyawa pencemar (kontaminan) lingkungan, serta sifat fisik kimia tanah. Sedangkan Elliott (1997) menyatakan bahwa indikator hayati tanah merupakan semua sifat – sifat biologi atau semua proses yang terjadi di dalam komponen tanah yang merupakan bagian dari ekosistem yang mempengaruhi kondisi ekosistem tertentu.

Nannipieri *et al.* (2003) menyatakan bahwa tanah adalah sebuah sistem biologi yang dinamis dan kompleks, atas dasar pendapat inilah banyak pakar yang berpendapat bahwa keragaman hayati berhubungan erat dengan kesehatan tanah. Dalam hal ini Saito (2003) menyampaikan bahwa berdasarkan beberapa studi

yang menaruh perhatian kepada keragaman hayati di Jepang mengindikasikan bahwa keragaman fauna tanah dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan lingkungan tanah, dan keragaman jamur atau bakteri di dalam rizosfer sehingga dapat digunakan sebagai alat yang berguna untuk memonitor kesehatan tanah.

## II. INTERAKSI BIOLOGIS DALAM TANAH

Tanah dikatakan sebagai suatu sistem alam yang hidup dikarenakan di dalamnya terdapat komponen abiotik dan biotik. Komponen biotik merupakan lingkup hayati yang terdiri dari kehidupan dan aktivitas flora dan fauna tanah. Di sisi lain bahan organik yang berasal dari tanaman dan hewan merupakan kumpulan senyawa yang mengandung energi dan karbon yang dibutuhkan bagi keberlangsungan jasad mikro dalam tanah. Oleh karena itu sistem hayati dalam tanah juga memasukkan bahan organik sebagai pemasok primer energi dan senyawa organik lain dalam sistem tersebut. Aktivitas hayati di dalam tanah secara umum menggambarkan hubungan dan interaksi antar komponen hayati dalam tanah. Brady (1990) menggambarkan pola hubungan tersebut sebagai berikut :



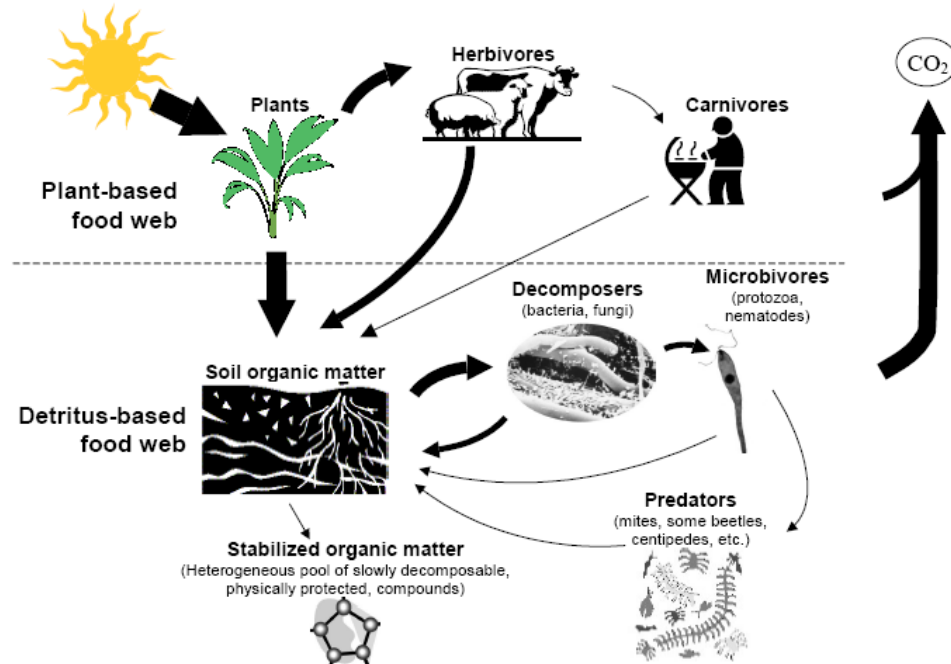
Gambar 2. Pola hubungan antar komponen hayati dalam tanah.

Konsumen primer merupakan kelompok pertama pemakan sisa tanaman dan hewan (detritivora), kelompok ini adalah hewan dan mikroflora yang hidup dari jaringan mati dan jaringan tanaman yang telah hancur yang ada di dalam tanah. Sedangkan konsumen sekunder adalah kelompok predator dan parasit termasuk tanaman tingkat rendah seperti bakteri, jamur, ganggang (*Algae*) dan lumut kerak (*Lichenes*), dan sebagai kelanjutan dari rantai makanan di alam, terdapat konsumen tersier yang merupakan organisme yang menjadikan karnivora lain (konsumen sekunder) sebagai makanannya. Flora mikro juga akan menyerang bagian – bagian kecil dari fases dan jaringan mati yang ada dalam tanah, atas dasar inilah flora mikro dalam tanah disebut juga sebagai pengurai terakhir (*The Ultimate Decomposer*). Bagian akhir dari seluruh proses ini adalah terbentuknya fraksi bahan organik yang bersifat lebih stabil yang disebut humus tanah. (Brady, 1990).

Di dalam biosfer, energi akan mengalami siklus berulang – ulang melalui jasad mikro yang berada dalam tanah (NRCS, 2004). Rantai makanan dalam tanah (*soil food web*) merupakan bagian dari siklus energi, hara dan air. Siklus energi dimulai pada saat energi matahari ditangkap oleh tanaman, dan tahap ini merupakan dasar bagi keberlangsungan rantai makanan. Ketersediaan hara ditentukan oleh sisa – sisa tanaman dan hewan yang berada dalam tanah, serta siklus air dipengaruhi oleh interaksi antara tanah, tanaman dan jasad dalam tanah. Rantai makanan dalam tanah secara lengkap di sajikan dalam gambar 3.

Lebih lanjut NRCS (2004) menyatakan bahwa rantai makanan dalam tanah berpengaruh pada siklus hara, stabilitas tanah dan erosi, kuantitas dan kualitas air serta kesehatan tanaman. Di dalam ekosistem tanah yang sehat, biota tanah mengatur aliran dan penyimpanan hara dalam berbagai cara, misalnya mereka menguraikan sisa – sisa tanaman dan hewan, memfiksasi nitrogen atmosferik, mengubah bentuk nitrogen dan hara lain dalam bentuk bermacam – macam senyawa organik dan senyawa an-organik, melepaskan hara tanaman dalam bentuk dapat tersedia, memobilisasi fosfor, bentuk – bentuk asosiasi mikoriza untuk proses pertukaran hara, dan bahkan aplikasi pupuk harus melalui aktivitas jasad yang ada di dalam tanah sebelum dapat dimanfaatkan tanaman. Berbagai

jenis jasad yang hidup di dalam tanah memainkan peran penting dalam proses pembentukan dan stabilisasi struktur tanah.



Gambar 3. Rantai makanan dalam tanah.

Di dalam ekosistem tanah yang sehat filamen jamur dan eksudat mikroba serta cacing membantu pengikatan antar partikel tanah membentuk agregat yang stabil dan meningkatkan infiltrasi air serta melindungi tanah dari erosi, pergerakan air dan pemampatan. Pori makro dibentuk oleh cacing dan binatang melata lain memudahkan masuk dan gerakan air dalam tanah, serta struktur tanah yang baik akan memudahkan perkembangan akar. Dengan memperbaiki dan stabilisasi struktur tanah, jasad dalam tanah yang dinamis membantu menurunkan aliran limpas (*run off*), memperbaiki infiltrasi, dan kapasitas filtrasi tanah. Di dalam ekosistem tanah yang sehat, jasad mikro menurunkan pengaruh jelek dari polusi dengan kapasitas menyangga (*buffering capacity*), detoksifikasi (*detoxifying*), dan menguraikan bahan – bahan polutan. Dalam jumlah kecil jasad mikro dalam tanah dapat menyebabkan penyakit tanaman. Di dalam ekosistem tanah yang sehat memiliki keragaman rantai makanan yang akan membuat organisme hama berada di dalam sistem kompetisi dan penciptaan musuh alami (*predation*). Beberapa jenis jasad mikro dalam tanah dapat melepaskan senyawa tertentu yang dapat memacu pertumbuhan tanaman atau menurunkan kerentanan tanaman terhadap penyakit.

Interaksi biologi dalam tanah secara nyata memberikan pengaruh positif kepada pertumbuhan tanaman. Dengan kata lain ketergantungan tanaman kepada tanah sebagai medium tumbuh sebetulnya lebih mengarah kepada kualitas interaksi biologi dalam medium tumbuh terutama rizosfer (zona perakaran) atau bagian tanah yang dipengaruhi oleh metabolisme akar, sebagaimana yang disampaikan oleh Werner (1992) bahwa rizosfer akar adalah zona kontak antara akar dan tanah yang secara langsung dipengaruhi oleh metabolisme akar. Menurut Lynch (1990) rizosfer dapat dibagi menjadi tiga yaitu endorizosfer yaitu lapisan sel akar itu sendiri, rizoplane yaitu permukaan sistem perakaran dan ektorizosfer yaitu area atau ruangan di sekitar perakaran (Werner, 1992). Rao (1994) menyatakan bahwa rizosfer lebih banyak dicirikan oleh banyaknya kegiatan jasad mikro dibandingkan kegiatan di dalam tanah yang jauh dari perakaran. Intensitas kegiatan ini tergantung dari panjang jarak tempuh yang dapat dicapai eksudat (cairan yang dikeluarkan akar) sistem perakaran. Eksudat akar ini merupakan substrat yang dibutuhkan jasad mikro, oleh karenanya jasad mikro terutama bakteri, jamur dan aktinomisetes di sekitar akar berjumlah lebih banyak dibandingkan bagian tanah lainnya. Bahkan Barber (1984) menyatakan bahwa jumlah jasad mikro di dalam rizosfer bisa 10 kali lebih banyak dibanding jumlah yang ada dalam seluruh satuan massa tanah. Laksmi Kumari (1961) dalam Rao (1994) menyajikan jumlah jasad dalam tanah rizosfer dan non-rizosfer hasil pengukuran di Laboratorium Dolichos sebagaimana disajikan dalam tabel di bawah ini :

Tabel 1. Jumlah jasad dalam tanah rizosfer dan non-rizosfer.

Jenis jasad	Tanah	Umur jasad (hari)				
		1	5	10	15	20
Bakteri ( $\times 10^7$ )	rizosfer	15,0	95,5	260,0	310,8	677,8
	non-rizosfer	2,0	2,0	1,1	2,0	2,5
Jamur ( $\times 10^4$ )	rizosfer	3,3	2,0	26,0	68,0	91,8
	non-rizosfer	0,9	1,6	1,5	1,7	6,8
Aktinomisetes ( $\times 10^6$ )	rizosfer	5,5	3,5	34,5	95,8	83,3
	non-rizosfer	4,5	6,0	1,3	1,0	1,0

Sumber : Rao (1994)

Selanjutnya Rao (1994) juga menyatakan bahwa beberapa faktor seperti tipe tanah, kelembaban tanah, pH dan temperatur serta kondisi tanaman mempengaruhi efek dari rizosfer. Efek rizosfer ini juga dipengaruhi oleh distribusi bakteri yang mempunyai kebutuhan khusus yaitu asam amino, vitamin B dan faktor pertumbuhan khusus dari senyawa nutrisi.

Jumlah dan distribusi jasad mikro yang ada di rizosfer dipengaruhi oleh eksudat yang dikeluarkan akar, sebagaimana yang disampaikan Werner (1992) bahwa aktivitas dan komposisi populasi mikrobia di dalam rizosfer dibatasi dan dipengaruhi oleh tipe dan jumlah eksudat akar. Antara 5 sampai 10 persen dari massa akar dan sampai 25 persen peningkatan pertumbuhan akar dapat digunakan oleh jasad mikro secara kemo-organotrof. Selanjutnya Rao (1994) menyatakan bahwa eksudat yang dikeluarkan oleh akar meliputi asam amino, gula, asam organik, vitamin – vitamin, nukleotida dan banyak senyawa lain yang belum teridentifikasi. Ciri dan jumlah eksudat akar dipengaruhi oleh spesies tanaman, umur dan kondisi lingkungan di tempat tanaman tersebut tumbuh.

Bais *et al.* (2006) menyatakan bahwa rizosfer meliputi ruang di sekitar akar tanaman pada jarak beberapa milimeter yang di dalamnya terdapat kompleks biologis dan proses ekologi, serta menjadi mediasi interaksi biologi di dalam tanah. Rizosfer ini juga menggambarkan dinamika tinggi proses interaksi antara akar dan mikroba yang menguntungkan dan yang merugikan (patogen), invertebrata dan pesaing sistem perakaran. Interaksi antara akar dan akar, akar dan mikroba serta akar dan hama dikelompokkan menjadi asosiasi positif dan asosiasi negatif. Asosiasi yang bersifat positif antara lain asosiasi simbiotik dengan epifit dan jamur mikoriza, dan kolonisasi akar oleh agensia kontrol biologi oleh bakteri serta bakteri penghasil senyawa pemacu pertumbuhan (*Plant Growth-Promoting Bacteria/PGPB*). Sedangkan asosiasi negatif antara lain kompetisi atau parasitisme dan alelopati antar tanaman, patogenesis yang ditimbulkan bakteri atau jamur dan invertebrata herbivor.

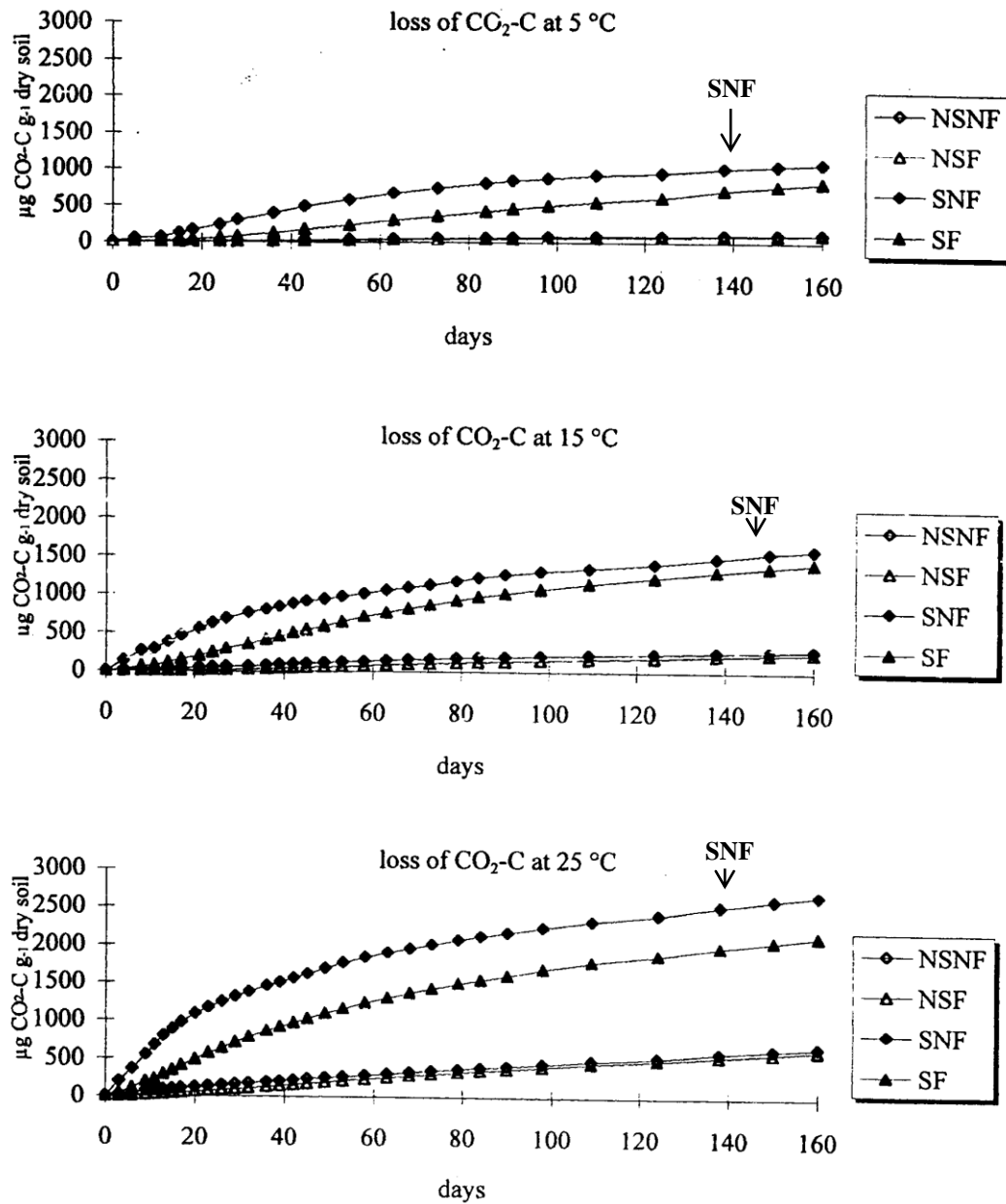
Dalam hubungannya dengan asosiasi positif dan negatif yang terjadi di dalam rizosfer, Rao (1994) menerangkan bahwa di dalam rizosfer terdapat kegiatan atau interaksi yang bersifat asosiatif dan antagonistik. Ketergantungan satu jasad mikro terhadap jasad mikro lain dalam hal produk ekstra-seluler, terutama asam amino



dan zat perangsang tumbuh, dapat dianggap suatu efek asosiatif. Banyak hasil studi yang dilaporkan dapat membuktikan bahwa ekstra-seluler bakteri, jamur dan algae tertentu meningkatkan pertumbuhan jasad mikro lain dalam kultur murni. Juga telah dapat diketahui adanya senyawa gibberelin dan senyawa yang serupa dengan gibberelin yang dihasilkan oleh genus – genus bakteri yang umumnya dijumpai dalam rizosfer seperti *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas* dan *Agrobacterium*. Peningkatan perkecambahannya yang sering diamati karena inokulasi *Azotobacter* mungkin disebabkan oleh senyawa perangsang pertumbuhan yang diekskresikan bakteri tersebut. Sekresi antibiotik oleh jasad mikro dan penghambatan pertumbuhan secara biologis terhadap jasad lain telah dapat ditunjukkan dengan baik di dalam tanah maupun dalam kultur murni. Sifat antagonistik ini menarik untuk diteliti dan dikembangkan lebih lanjut terutama dalam memberikan penghambatan pertumbuhan jasad mikro yang bersifat patogen bagi tanaman.

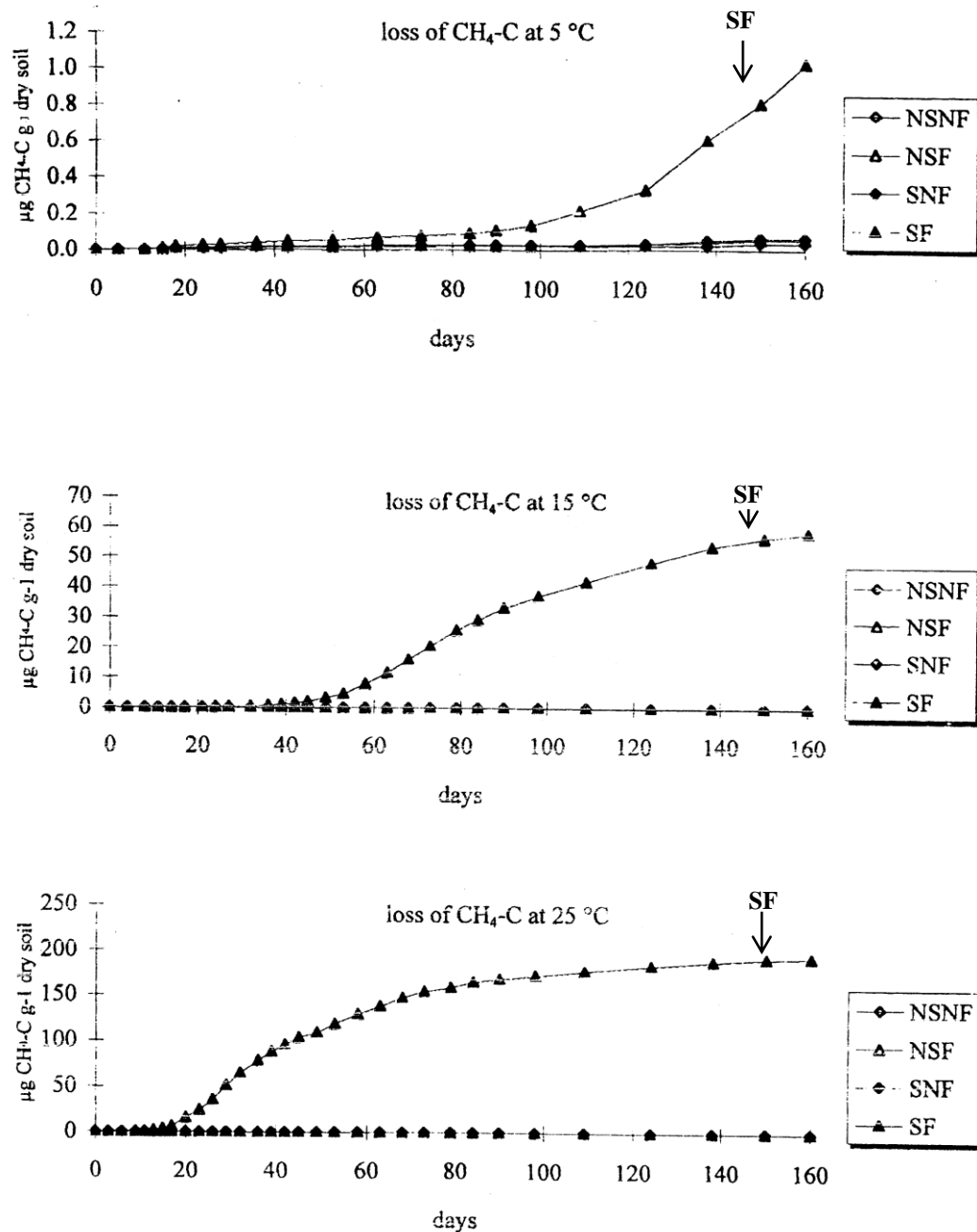
Beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan para pakar terhadap kandungan bahan organik baik yang berasal dari sisa – sisa tanaman maupun masukan bahan organik segar, serta aktivitas dekomposisi yang ditimbulkannya menjadi masalah dan perhatian pakar lingkungan dan pertanian. Dampak pengelolaan sisa – sisa tanaman terhadap bahan organik tanah dan kesuburan jangka panjang telah menjadi perhatian besar dalam penelitian sebagai upaya meningkatkan kualitas tanah dan kesehatan tanah, terutama dalam menopang penyediaan hara tanaman lewat proses interaksi biologi selama proses dekomposisi bahan organik. Proses mineralisasi disamping dipengaruhi oleh macam bahan sumber bahan organik dan keragaman hayati juga oleh situasi lingkungan terutama temperatur dan kondisi kelembaban tanah. Devedre dan Horwath (2000) telah merakit sebuah percobaan yang mencoba menguji efisiensi dekomposisi jerami padi dan karbon mikrobial di bawah temperatur dan kelembaban yang berbeda dari sawah aerob dan an-aerob. Proses pembedaan proses dekomposisi (mineralisasi karbon) yang berjalan dalam sawah aerobik dan sawah an-erob didasarkan pada pemahaman bahwa dalam suasana aerobik dekomposisi bahan organik dapat berjalan dengan baik dan hal ini dapat dilihat dari produksi CO<sub>2</sub>. Sedangkan dalam suasana an-aerob ada kecenderungan penurunan mineralisasi karbon dan akan meningkatkan emisi

metan ( $\text{CH}_4$ ). Proses mineralisasi karbon ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$ ) untuk kedua jenis tanah sawah (aerobik dan an-aerobik) ditetapkan dengan pengukuran produksi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$  pada temperatur 5, 15 dan 25° C. Hasil percobaan tersebut disajikan dalam gambar berikut ini :



NSNF = Non Straw, Non Flooded      NSF = Non Straw, Flooded  
 SNF = Straw, Non Flooded            SF = Straw, Flooded

Gambar 4. Produksi  $\text{CO}_2$  selama 160 hari masa inkubasi.



NSNF = Non Straw, Non Flooded      NSF = Non Straw, Flooded  
 SNF = Straw, Non Flooded            SF = Straw, Flooded

Gambar 5. Emisi CH<sub>4</sub> selama 160 hari masa inkubasi.

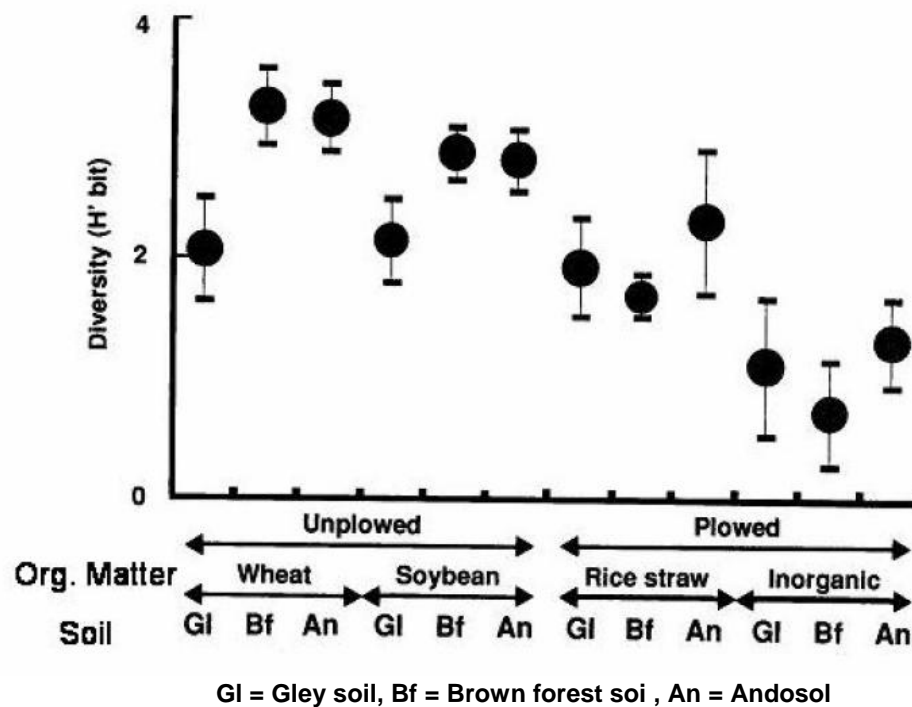
Gambar 4 menjelaskan bahwa pemberian bahan organik (jerami) dapat meningkatkan aktivitas jasad mikro, hasil pengukuran produksi CO<sub>2</sub> selama 160

hari masa inkubasi memberikan keterangan bahwa dalam suasana tidak tergenang (aerobik) dekomposisi bahan organik berjalan lebih lancar dibandingkan dengan media yang tidak diberi jerami dan digenangi (dalam suasana an-aerobik). Sedangkan pengamatan produksi CO<sub>2</sub> pada kondisi lingkungan yang berbeda (temperatur 5, 15 dan 25°C) membuktikan bahwa peningkatan temperatur dalam media inkubasi sampai batas tertentu (mungkin) di sekitar temperatur ruangan dapat memacu dekomposisi bahan organik. Sedangkan gambar 5 menerangkan bahwa penggenangan membuat media bersuasana an-aerobik yang akan menghambat proses dekomposisi bahan organik (produksi CO<sub>2</sub> menurun). Pengukuran emisi CH<sub>4</sub> (metan) menunjukkan bahwa dengan pemberian jerami dan suasana tergenang, proses dekomposisi bahan organik terhambat, sementara pembentukan CH<sub>4</sub> sebagai akibat suasana an-aerob semakin meningkat. Walaupun dalam suasana an-aerob, ternyata peningkatan temperatur media menyebabkan peningkatan emisi CH<sub>4</sub> dan proses lebih banyak terjadi dalam media yang tergenang. Percobaan yang telah dilakukan oleh Devevre dan Horwath (2000) ini membuktikan bahwa aktivitas jasad mikro di dalam tanah dipengaruhi oleh ketersediaan bahan organik dan faktor lingkungan yang dalam hal ini digunakan suasana aerob dan an-aerobik serta temperatur media.

Bentuk – bentuk perlakuan yang diberikan kepada tanah termasuk pengelolaan tanah maupun pola pertanaman, macam sumber bahan organik dan jenis tanah secara nyata berpengaruh kepada keragaman hayati yang ada dalam tanah. Percobaan yang telah dilakukan Enami (2000) dalam Saito (2003) yang menguji dampak pengolahan tanah, macam sumber bahan organik dan jenis tanah kepada keragaman hayati spesies fauna tanah khususnya tungau oribatid (*Oribatide Mites*) menghasilkan pola hubungan sebagaimana gambar 6.

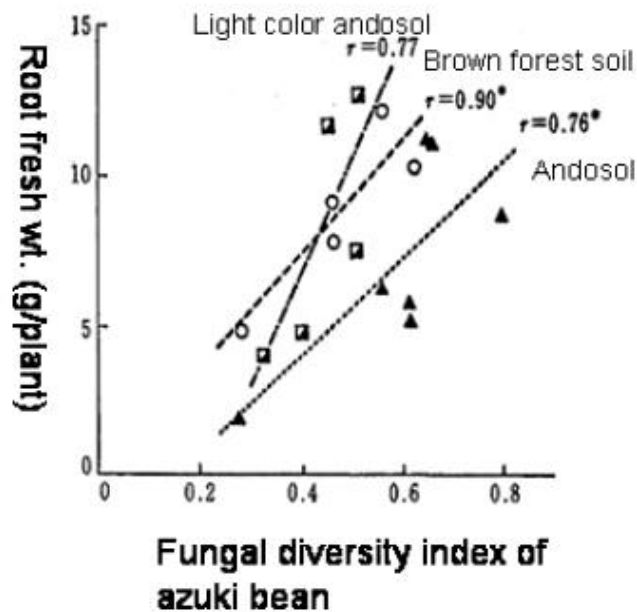
Gambar tersebut menerangkan bahwa pengolahan tanah cenderung menurunkan keragaman fauna tanah. Sedangkan untuk tanah yang tidak diolah, sumber bahan organik yang berasal dari tanaman gandum cenderung meningkatkan keragaman spesies fauna tanah lebih besar dibanding kedelai; serta dalam tanah yang diolah, jerami padi meningkatkan keragaman spesies fauna tanah dibanding pemberian pupuk an-organik. Dalam hubungannya dengan jenis tanah yang dipakai dalam percobaan ini, gambar tersebut memperlihatkan bahwa

dalam tanah yang tidak diolah, tanah hutan (*Brown forest soil*) memiliki keragaman spesies fauna tanah lebih tinggi dibandingkan kedua jenis tanah lainnya (*Gley soil* dan *Andosol*). Sedangkan dalam tanah yang diolah, Andosol memiliki keragaman spesies fauna tanah lebih tinggi dibanding kedua jenis tanah lainnya (*Gley soil* dan *Brown forest soil*), tetapi secara umum pemberian pupuk an-organik dapat menurunkan keragaman spesies fauna tanah. Percobaan ini sejalan dengan pendapat Doran dan Safley (1997) yang menyatakan bahwa tanah memainkan peran kunci dalam siklus hara makro (C, P, N, S dan lainnya) yang dibutuhkan sistem biologi, dekomposisi sampah organik dan detoksifikasi senyawa – senyawa berbahaya.



Gambar 6. Dampak pengolahan tanah, sumber bahan organik dan jenis Tanah kepada keragaman spesies fauna tanah.

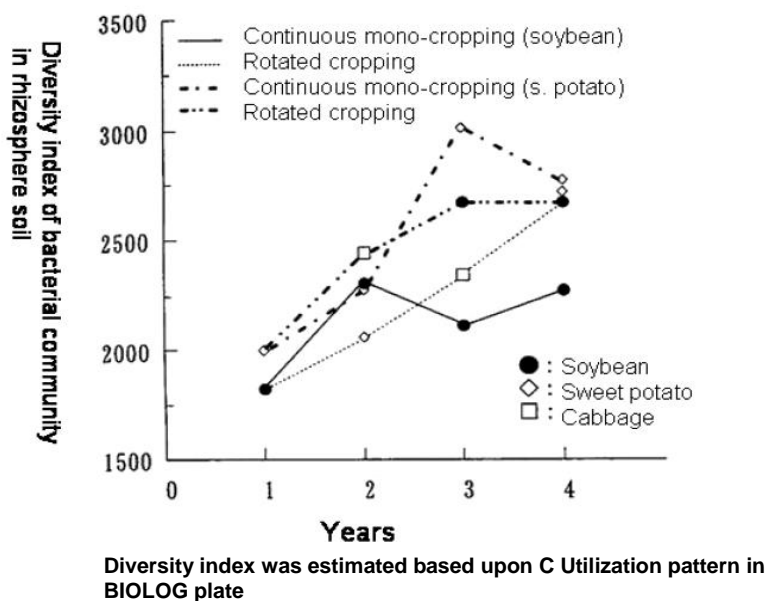
Percobaan lain yang mencoba membuktikan kaitan jenis tanah dan keragaman hayati telah dilakukan oleh Matsuguchi dan Nitta (1987) dalam Saito (2003) yang melakukan pengamatan pertanaman kacang Azuki (*Azuki Bean*) di lahan pertanian Jepang. Hasil pengamatannya disajikan dalam gambar berikut ini :



Gambar 7. Hubungan antara jenis tanah dan indkes keragaman jamur.

Hasil percobaan Matsuguchi dan Nitta (1987) menunjukkan bahwa berdasarkan kenaikan berat akar segar kacang Azuki yang ditanam di tanah Andosol memberikan rata-rata indeks keragaman jamur paling tinggi dibanding jika ditanam di kedua jenis tanah lainnya (*Andosol light color dan Brown forest soil*), serta secara umum hubungan tersebut menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya indeks keragaman jamur, perkembangan akar dapat ditingkatkan.

Pola tanam baik mono kultur maupun rotasi memberikan pengaruh kepada keragamaman hayati dalam tanah. Pengaruh ini muncul akibat digunakannya spesies tanaman yang berbeda dalam rotasi tanaman. Katayama *et al.* (2000) dalam Saito (2003) mengamati dampak penerapan mono-cropping selama 4 tahun kepada komunitas bakteri yang ada dalam rizosfer tanaman kedelai kentang dan kubis Hasil penelitian yang dilakukannya disajikan dalam gambar berikut :



Gambar 8. Pengaruh mono-kultur kepada indeks keragaman bakteri.

Pola tanam mono kultur dan rotasi tanaman dilaksanakan selama 4 tahun berturut – turut, hasil akhir memperlihatkan bahwa tanaman yang dibudidayakan dalam rotasi cenderung memiliki keragaman komunitas bakteri di dalam rizosfernya. Hal ini membuktikan bahwa keragaman hayati di dalam tanah dipengaruhi oleh macam tanaman yang dibudidayakan. Pola tanam rotasi akan memunculkan keragaman eksudat akar, dan hal ini mengakibatkan peningkatan keragaman hayati yang ada di dalam tanah.

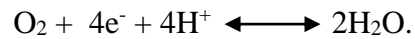
### III. INTERAKSI BIOLOGIS DAN UNSUR NITROGEN DALAM TANAH

Nitrogen adalah unsur hara utama dalam penyediaan nutrisi tanaman, dan merupakan komponen utama dalam klorofil, protoplasma serta protein. Nitrogen berperan dalam banyak proses fisiologi, terutama fase pertumbuhan vegetatif dan memberikan warna hijau pada daun. Marschner (1986) menjelaskan bahwa ammonium dan nitrat merupakan sumber utama nitrogen an-organik yang diserap tanaman. Kebanyakan ammonium akan dirangkaikan ke dalam bentuk senyawa organik di dalam akar, sementara nitrat bergerak bebas di dalam xylem dan juga disimpan di dalam vakuola jaringan akar, ranting dan organ penyimpan makanan

cadangan. Hasset dan Banwart (1992) menyampaikan bahwa nitrogen adalah faktor pembatas dalam semua bentuk proses produksi bahan pangan. Hal ini dipertegas oleh Chapin, Vitousek dan Cleve (1986) dalam Brooks (2003) bahwa nitrogen tanah merupakan determinan penting bagi produktivitas, dan keragaman tanaman. Perubahan - perubahan bentuk yang selalu dialaminya, menyebabkan nitrogen banyak menarik perhatian pakar kimia, dan sering disebut sebagai unsur yang eksklusif serta unik.

Perubahan bentuk yang selalu dialami unsur nitrogen di dalam alam disebabkan oleh potensi kelistrikan yang diakibatkan oleh adanya transfer elektron dari satu senyawa ke senyawa lain dan peristiwa ini sering disebut sebagai pasangan reaksi oksidasi-reduksi. Dalam proses oksidasi-reduksi elektron selalu berasosiasi dengan ion  $H^+$ . Bohn *et al.* (1985) menyatakan bahwa ion hidrogen dan elektron ( $e^-$ ) disebut sebagai variabel utama yang mengendalikan reaksi kimia, karena kesesuaian ion  $H^+$  dan  $e^-$  baik secara terpisah maupun bersama-sama sering menentukan arah, aras (*level*) dan produk akhir reaksi kimia organik maupun an-organik. Bahkan ion  $H^+$  sering dianggap sebagai penentu dan pengendali sifat-sifat ion di dalam tanah, dan dalam hubungannya dengan hara tanaman, ion  $H^+$  mempengaruhi status ion hara, terutama kelarutan, ketersediaan dan mobilitas hara dalam larutan tanah. Reaksi oksido-reduksi menyatakan selalu terjadinya pasangan reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksido-reduksi ini menyebabkan adanya reaksi senyawa-senyawa yang masing-masing berperan sebagai Reduktan yaitu senyawa teroksidasi (donor elektron) di satu sisi, serta di sisi lain berperan sebagai senyawa Oksidan yaitu senyawa yang tereduksi (aseptor elektron). Di dalam tanah bahan organik menjadi donor elektron terbesar. Dekomposisi atau oksidasi bahan organik dalam tanah akan menyumbang elektron untuk kemudian diterima oleh oksigen. Donor elektron lain yang ada di dalam tanah adalah nitrogen dalam kelompok senyawa amino ( $-NH_2$ ) dan sulfur dalam kelompok senyawa sulfidril ( $-SH$ ), serta ion amonium dalam bahan organik. Pada saat kondisi dalam tanah berubah menjadi an-aerob, jasad mikro juga dapat membuat donor elektron lain. Dalam peristiwa oksido-reduksi di dalam tanah terutama dalam proses oksidasi senyawa organik, oksigen merupakan aseptor elektron paling kuat seperti yang diperlihatkan dalam reaksi :



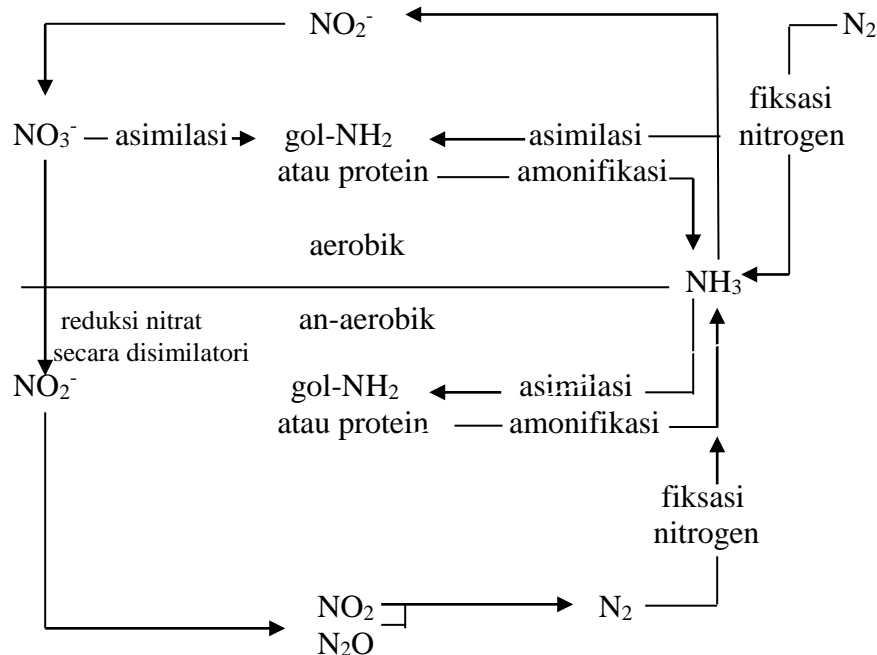


Kekurangan nitrogen bagi tanaman dapat menurunkan warna hijau daun dan bagian lain dari morfologi tanaman. Dalam kondisi kekurangan nitrogen yang berkepanjangan menyebabkan gejala klorosis, daun tua akan berwarna kekuningan dan akhirnya akan gugur. Morfologi tanaman dengan gejala klorosis dapat menurunkan proses fotokemis dan akhirnya menurunkan efisiensi fotosintesis, sebagaimana disampaikan oleh Tisdale, *et al.* (1993) bahwa kekurangan nitrogen menyebabkan daun tanaman berwarna hijau pucat atau kuning cerah serta produksi klorofil dikurangi termasuk produksi pikmen kuning, karoten dan santofil. Sedangkan Jones, J.B., *et al.* (1991) menyatakan bahwa kekurangan nitrogen bagi tanaman dapat menurunkan laju pertumbuhan, tanaman menjadi lemah dan kerdil. Di dalam jaringan tanaman, nitrogen diendapkan dalam jaringan tua, oleh karena itu kekurangan nitrogen lebih sering diperlihatkan pada daun – daun yang berumur lebih tua. Kekurangan nitrogen yang berlanjut menyebabkan tanaman mengalami kematangan yang dipercepat dan akhirnya kualitas hasil secara signifikan menurun.

Tisdale, *et al.* (1993) menyatakan bahwa nitrogen yang berada dalam tanah dapat dikelompokkan menjadi bentuk senyawa organik dan an-organik, sementara 95% lebih nitrogen di tanah permukaan berada dalam bentuk N-organik. Bentuk nitrogen an-organik dalam tanah antara lain ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), oksida nitrogen ( $\text{N}_2\text{O}$ ), oksida nitrit (N) dan nitrogen elemental ( $\text{N}_2$ ). Dari sudut kesuburan tanah, ion ammonium, nitrit dan nitrat bersifat lebih penting, sedangkan  $\text{N}_2\text{O}$  dan NO lebih banyak dipandang dari sisi negatif, yaitu proses kehilangan nitrogen dari dalam tanah lewat proses denitrifikasi.

Berbagai bentuk senyawa nitrogen di atas saling memiliki keterkaitan antar satu bentuk senyawa dengan yang lainnya, dan secara biogeokemis siklusnya dapat diragakan sebagaimana gambar 9.

Hesse (1971) menyatakan bahwa sebagian besar bentuk nitrogen an-organik dalam tanah biasanya berada di dekat permukaan, dan bentuk nitrogen an-organik tersebut termasuk nitrat yang larut dalam larutan tanah, mudah diserap dan mudah tercuci ke bawah, sementara ion ammonium berada dalam bentuk yang mudah dipertukarkan dan bentuk ammonium terikat yang tidak tersedia.

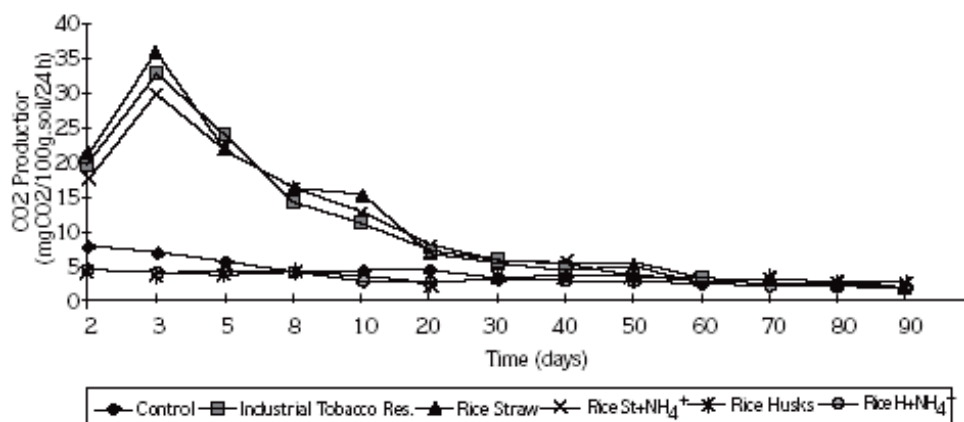


Gambar 9. Siklus Biogeokemis Nitrogen.

Bentuk - bentuk nitrogen dalam tanah secara garis besar terdiri atas senyawa nitrogen organik dan senyawa nitrogen an-organik. Keberadaan bentuk senyawa nitrogen ini lebih banyak dipengaruhi oleh adanya interaksi biologi yang terjadi di dalam tanah. Interaksi biologi yang terjadi di dalam tanah lebih banyak dihubungkan dengan adanya bahan dan substrat organik serta flora dan fauna dalam tanah. Brady (1990) menyatakan bahwa kehadiran bentuk kehidupan di dalam tanah memunculkan beberapa keuntungan antara lain proses dekomposisi bahan organik, tranformasi bentuk menjadi senyawa an-organik yang dapat dimanfaatkan tanaman, serta fiksasi nitrogen.

Dalam proses mineralisasi bahan organik lebih banyak ditentukan oleh kualitas biokemis tanah. Percobaan yang dilakukan oleh Bending *et al.* (2002) yang menguji interaksi antara sisa tanaman dan kualitas bahan organik tanah dan keragaman fungsional dari komunitas mikroba tanah menunjukkan bahwa baik sisa tanaman dan kualitas bahan organik tanah keduanya mempengaruhi keragaman fungsional dari komunitas mikrobia tanah. Kadar bahan organik tanah yang dipergunakan dalam percobaan ini berpengaruh pada fungsi komunitas

mikrobia tanah terutama dalam proses mineralisasi nitrogen sisa tanaman yang diberikan. Kara (2000) menyatakan bahwa selain sebagai sumber utama unsur C, N, P dan S, bahan organik tanah merupakan salah satu komponen tanah terpenting yang menentukan produktivitas dan keberlanjutan pertanian karena secara luas penyediaan nitrogen bergantung kepada bahan organik tanah dan aktivitas mikrobia tanah. Sebagaimana percobaan Bending *et al.* (2002), Dia juga menguji pengaruh dari beberapa macam sisa tanaman terhadap mineralisasi nitrogen dan aktivitas biologis di dalam tanah. Laju mineralisasi nitrogen diukur dengan menetapkan kandungan N-mineral ( $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$ ), dan aktivitas biologis diukur dengan menetapkan produksi  $\text{CO}_2$  selama 90 hari masa inkubasi. Hasil akhir percobaan tersebut disajikan dalam gambar berikut :



Gambar 10. Hubungan antara macam sumber bahan organik dan produksi  $\text{CO}_2$ .

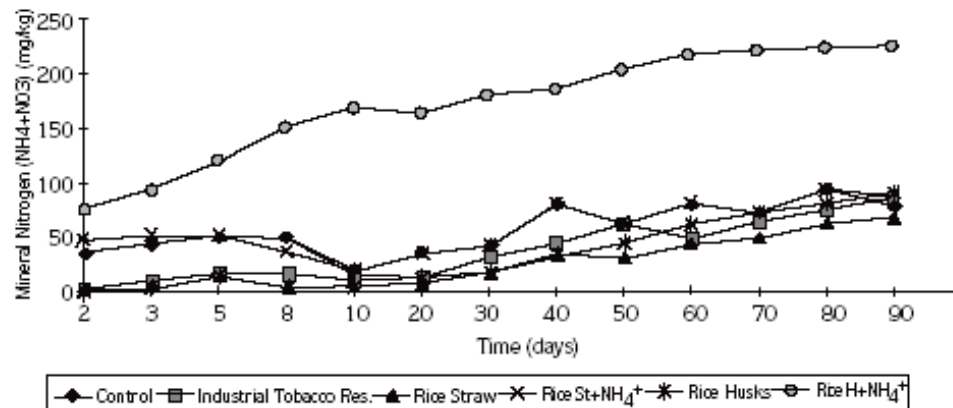
Gambar 10 memperlihatkan bahwa antara kontrol, sekam padi dan sekam padi+ $\text{NH}_4^+$  terdapat pola yang sama yaitu rendah dalam memproduksi  $\text{CO}_2$ . Pada awal inkubasi (dari hari ke 2 sampai dengan hari ke 10) kontrol (tanah tanpa pemberian bahan organik) menunjukkan penurunan aktivitas jasad mikro dalam melakukan dekomposisi bahan organik yang ada dalam sampel tanah. Sedangkan kenaikan kecil produksi  $\text{CO}_2$  ditunjukkan pada sampel tanah yang mendapatkan perlakuan sekam padi (tanah +sekam padi dan tanah+sekam padi+ $\text{NH}_4^+$ ). Setelah hari ke 10, ketiga sampel tanah ini menunjukkan penurunan aktivitas dekomposisi bahan organik. Perlakuan pemberian sekam padi ternyata sampai dengan akhir

masa inkubasi (90 hari) tidak mampu meningkatkan proses dekomposisi bahan organik. Hal ini disebabkan karena tingginya rasio C/N sekam padi yang digunakan dalam percobaan ini. Penambahan pupuk nitrogen juga ternyata tidak mampu menginduksi (memacu) aktivitas jasad mikro dalam mendekomposisikan sekam padi, dan bahkan ada pemanfaatan senyawa pupuk ( $\text{NH}_4^+$ ) sebagai sumber elektron oleh jasad mikro. Sedangkan sampel tanah yang mendapatkan perlakuan bahan organik yang lain (sisa industri tembakau, jerami padi dan jerami padi+ $\text{NH}_4^+$ ) menunjukkan produksi  $\text{CO}_2$  yang sangat tinggi pada awal masa inkubasi (hari ke 2 dan ke 3), dan mengalami penurunan signifikan sampai hari ke 50 dan akhirnya menunjukkan produksi  $\text{CO}_2$  yang hampir sama dengan perlakuan lain sampai dengan berakhirnya masa inkubasi. Secara garis besar pola hubungan antara sumber bahan organik terhadap produksi  $\text{CO}_2$  lebih banyak berhubungan dengan rasio C/N sumber bahan organik yang digunakan dalam percobaan ini sebagaimana disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 2. Komposisi sumber bahan organik.

Sumber bh.org	N	P	K	C/N
sisa ind.				
tembakau	2,7	0,5	1,5	11,3
jerami	0,3	0,4	1,0	66,7
sekam	0,5	0,3	1,2	76,0

sumber : Kara (2000)



Gambar 11. Hubungan antara sumber bahan organik dan proses pembentukan mineral nitrogen.

Hasil pengukuran mineral nitrogen ( $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$ ) menunjukkan bahwa kecuali perlakuan sekam padi+ $\text{NH}_4^+$  selama 10 hari masa inkubasi menunjukkan penurunan mineralisasi nitrogen. Hal ini memunculkan dugaan bahwa di dalam sampel –sampel tanah tersebut telah terjadi immobilisasi nitrogen, karena kebutuhan jasad mikro akan unsur N untuk membangun jaringan tubuhnya, terutama sumber bahan organik yang berasal dari industri tembakau dan sumber bahan organik yang mendapat tambahan pupuk N. Setelah 10 hari masa inkubasi rasio C/N dan penambahan pupuk N menghasilkan taraf mineralisasi nitrogen yang bervariasi dengan perlakuan sekam padi+ $\text{NH}_4^+$  yang menunjukkan peningkatan produksi mineral nitrogen paling besar. Selanjutnya menurut Kara (2000) sekam padi yang dicampur dengan pupuk N ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ) merupakan kombinasi yang sepertinya memberikan keuntungan paling besar bagi penyediaan dan keseimbangan hara nitrogen.

Interaksi biologi dalam tanah sebagaimana disampaikan oleh Rao (1994) dan NRCS (2004) mempengaruhi siklus hara dalam tanah. Penelitian dan percobaan yang banyak dikembangkan dalam rangka mengupayakan keberlanjutan pertanian adalah interaksi biologi dalam tanah yang berpengaruh pada siklus N dan fiksasi P. Fiksasi nitrogen secara biologi telah terbukti cukup banyak menyumbang ketersediaan N bagi tanaman. Bergantung dari jenis flora dan fauna yang ada dalam tanah, serta jenis tanaman, cuplikan sebagian data yang disampaikan Brady (1990) membuktikan bahwa fiksasi biologi ini merupakan sumber penyediaan nitrogen dalam tanah yang cenderung ramah lingkungan. Cuplikan data tersebut antara lain untuk kelompok tanaman legum yang bersimbiosis dengan *Rhizobium* pada tanaman Alfalfa (*Medicago sativa*) menghasilkan 150 – 250 kg N/ha/th.; tanaman kedelai (*Glycine max.L.*) menghasilkan 50 – 150 kg N/ha/th.; buncis (*Phaseolus vulgaris*) menghasilkan 30 – 50 kg N/ha/th. Kelompok tanaman non legum misalnya *Azolla* yang bersimbiosis dengan blue green Algae (*Anabaena*) menghasilkan 150 – 300 kg N/ha/th. Sedangkan jasad yang tidak bersimbiosis serta memiliki kemampuan menyumbang ketersediaan N dalam tanah adalah kelompok bakteri (*Azotobacter* dan *Clostridium*) yang mampu menyumbang 5 – 20 kg N/ha/th., dan blue green Algae (*Anabaena*) yang menyumbang 10 – 50 kg N/ha/th.

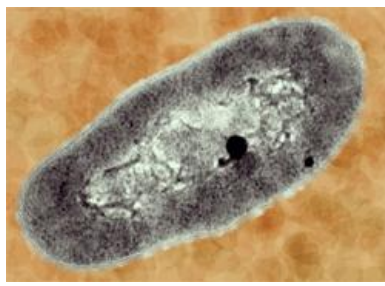
Banyak jenis jasad (organisme) yang hidup dalam tanah secara bebas serta jasad yang mampu berasosiasi dan berinteraksi dengan tanaman dalam memfiksasi nitrogen dan digolongkan sebagai berikut :

- Jasad mikro Asimbiotik (hidup bebas).

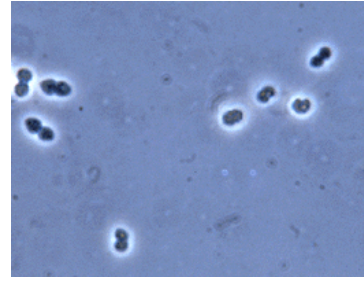
Rao (1994) membagi jasad ini menjadi organisme aerob obligat, aerob fakultatif dan an-aerob. Bakteri aerob obligat di antaranya genus-genus *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Derxia*, *Archromobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter* dan *Bacillus*. Bakteri aerob fakultatif antara lain genus *Aerobacter*, *Klebsiella* dan *Pseudomonas*. Sedangkan bakteri an-aerob diantaranya genus *Clostridium*, *Chlorobium*, *Chromatium*, *Rhodomicrobium*, *Rhodo-pseudomonas*, *Rhodospirillum*, *Desulfovibrio* dan *Methanabacterium*. Disamping itu juga ganggang biru-hijau (*Cyanobacterium*), terutama yang paling banyak dijumpai adalah *Anabaena* dan *Nostoc*.



Agrobacterium



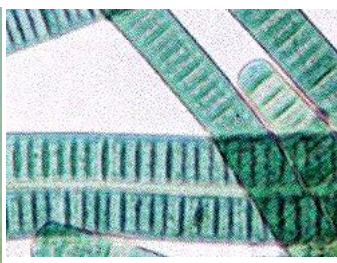
Arthrobacter



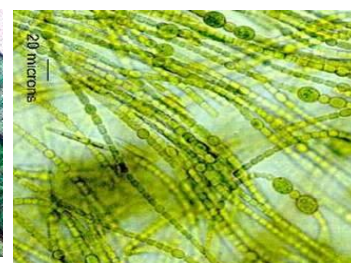
Azotobacter



Anabaena



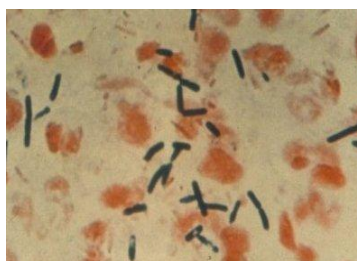
Cyanobacterium



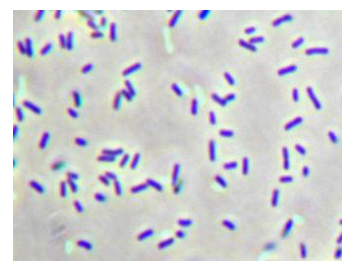
Nostoc



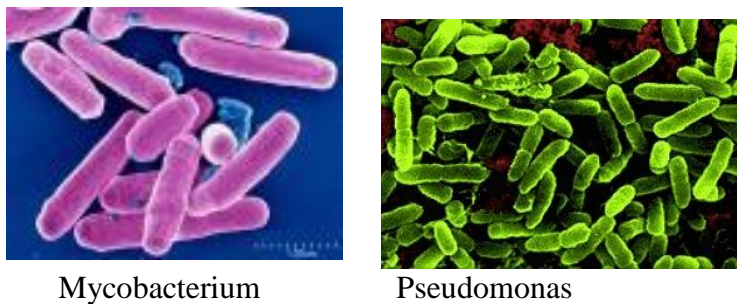
Bacillus



Clostridium



Chlorobium



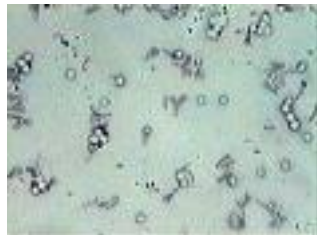
Mycobacterium

Pseudomonas

Gambar 12. Jasad mikro asimbiotik.

- Jasad mikro Simbiotik (Pembentuk bintil).

Yang termasuk didalamnya adalah *Rhizobium* (bersimbiotik dalam tanaman legum), *Actinomycetes* (misalnya *Frankia*, sp) dan ganggang biru-hijau yang merupakan pembentuk bintil akar. Ada juga bakteri yang hidup bebas serta dapat membentuk bintil daun (filosfer) tanaman hutan yang berkayu.



Rhizobium



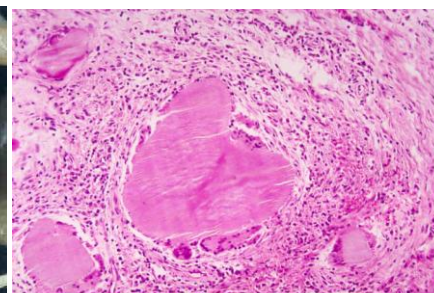
Frankia, sp.



Frankia, sp.



Nodulasi tanaman legum.



Actinomycetes.

Gambar 13. Jasad mikro simbiotik dan nodul tanaman legum.

- Jasad mikro Simbiotik yang tidak membentuk bintil.

Bakteri simbiotik yang tidak membentuk bintil tetapi cukup dikenal sebagai penambah pupuk hijau Azolla, adalah ganggang biru-hijau yang berasosiasi dengan paku-pakuan (*Azolla*) dan lumut kerak (*Lychenes*), juga *Azotobacteriaceae* yang berasosiasi dengan rumput-rumputan.



Gambar 14. *Azolla pinnata*

Menurut Graham (1982) proses fiksasi nitrogen oleh tanaman legum merupakan kompleks interaksi antara inang, *Rhizobium* dan lingkungan. Dalam proses fiksasi nitrogen ini inang memainkan peran penting dalam mengontrol proses simbiosis. Wynne *et al.* (1982) melaksanakan percobaan untuk menguji faktor tanaman inang yang mempengaruhi fiksasi nitrogen kacang. Dalam percobaan ini digunakan 8 kultivar kacang (*Arachis hypogea* L.) yang memiliki pertumbuhan yang berbeda, dan ditanam dengan desain split plot dalam blok yang diacak sempurna serta diulang 5 kali. Penetapan berat nodul aktif per tanaman dan fiksasi nitrogen lewat pengukuran  $C_2H_4$  dalam jaringan tanaman menunjukkan bahwa perbedaan kultivar kacang sebagai tanaman inang menghasilkan proses fiksasi nitrogen yang berbeda, yang ditunjukkan dengan perbedaan berat nodul dan konsentrasi  $C_2H_4$ . Hasil lengkap percobaan di atas disajikan dalam tabel berikut :

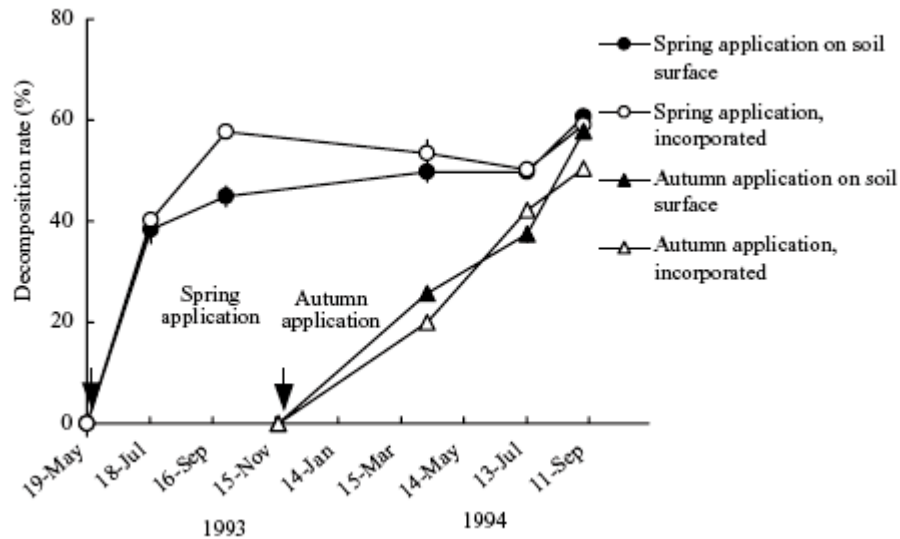


Tabel 2. Pengaruh perbedaan kultivar kacang kepada fiksasi N.

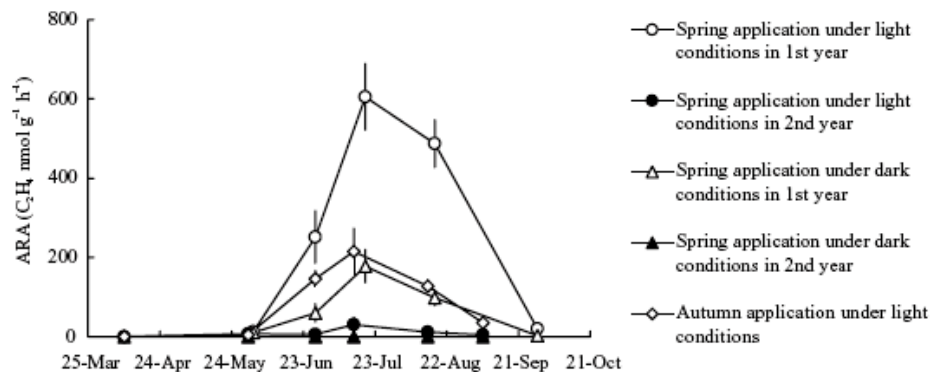
Kultivar Kacang	sifat kematangan	berat nodul (g/tan.)	konsentrasi C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (μmol/tanaman)
Tennessee Red	sangat awal	0,80	15,4
Spanhoma	sangat awal	0,64	13,1
Florunner	sedang	1,33	22,2
PI262090	lambat	0,96	16,1
Florigiant	sedang	1,75	23,5
NC4	sedang	1,47	21,4
NC6	sedang	1,47	23,1
Early Bunch	awal	1,13	19,1

Potensi penyediaan nitrogen bagi tanaman lewat proses fiksasi biologi sangat besar peluangnya untuk dikembangkan lebih lanjut. Peoples *et al.* (1995) menyatakan bahwa peningkatan fiksasi N secara biologi (*biological N<sub>2</sub> fixation*/BNF) dapat ditingkatkan melalui beberapa cara (a) memaksimalkan jumlah dan keefektifan rhizobia di dalam tanah, (b) menurunkan kandungan nitrat dalam tanah, (c) menurunkan sensitivitas simbiosis antara tanaman-bakteri dan bentuk interaksinya dengan kehadiran nitrat tanah, memaksimalkan pertumbuhan legume, dan (c) meningkatkan eksploitasi genotip yang memiliki keragaman terhadap rhizobia, tanaman inang dan interaksi antara tanaman inang dan strain tertentu.

Memperkuat pendapat Graham (1982) di atas, Kondo dan Yasuda (2003) menyatakan bahwa dalam suasana tergenang dalam lahan padi dapat menyediakan kondisi yang cocok bagi berlangsungnya proses fiksasi N<sub>2</sub> (*Biological N<sub>2</sub> Fixation*/BNF) baik oleh jasad mikro fototropik maupun heterotropik. Percobaan yang dilakukan mencoba untuk mencari hubungan antara perubahan musim dalam proses aktivitas fiksasi N<sub>2</sub> dan pengayaan N dalam lahan padi (sawah) yang dipengaruhi oleh pengelolaan tanah di kawasan Jepang Utara. Hasil percobaan membuktikan bahwa perbedaan musim dan sumber cahaya berpengaruh pada proses dekomposisi dan aktivitas reduksi asetilin jerami padi sebagaimana gambar di bawah ini :



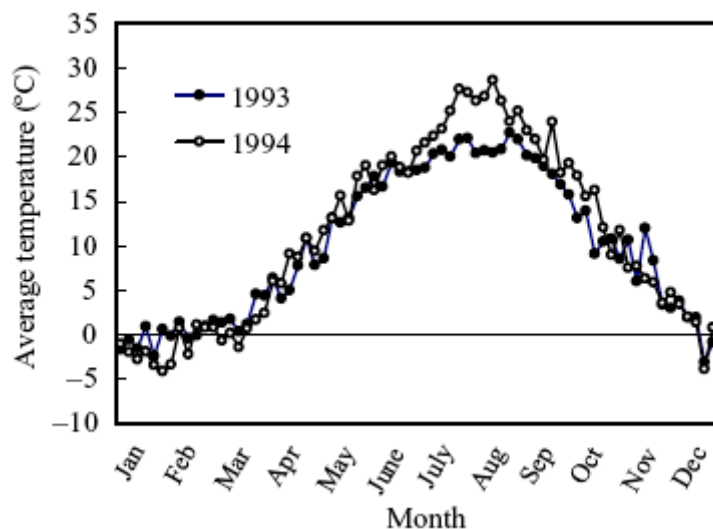
Gambar 15. Pengaruh musim dan sumber cahaya kepada tingkat dekomposisi jerami.



Gambar 16. Pengaruh musim dan sumber cahaya kepada aktivitas reduksi asetilin.

Gambar 15 memperlihatkan bahwa pemberian jerami yang dilaksanakan pada awal musim semi (*spring*) maupun awal musim gugur (*autumn*) memberikan pola dekomposisi jerami yang berbeda. Sedangkan gambar 16 menunjukkan bahwa aplikasi jerami padi yang diberikan pada tahun pertama baik dalam musim semi maupun musim gugur meningkatkan aktivitas reduksi asetilin (*Acetylene Reduction Activity*/ARA), sedangkan pada tahun kedua aktivitas reduksi asetilin menurun drastis.

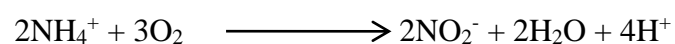
Perbedaan musim mengakibatkan adanya perbedaan temperatur sebagaimana gambar rata-rata temperatur pada tahun 1993 dan 1994 di lokasi percobaan sebagaimana disajikan dalam gambar 17 berikut :



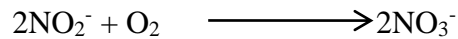
Gambar 17. Rata – rata temperatur lokasi percobaan tahun 1993-1994.

Nitrifikasi merupakan kunci proses transformasi N yang menyediakan sebagian besar sumber mineral N untuk biota dalam ekosistem dan mempengaruhi sifat kimiawi atmosferik dan hidrosferik melalui reaksi produk sekundernya. (Rajapaksha, 1997).

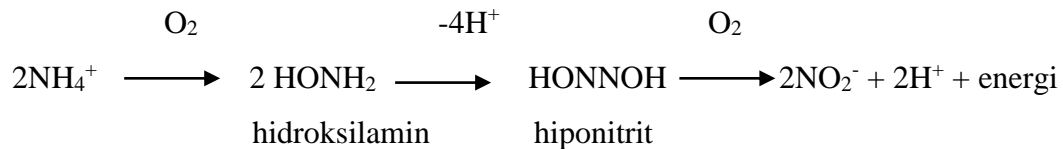
Nitrifikasi merupakan proses perubahan bentuk nitrogen dari ion ammonium menjadi ion nitrat. Brady (1990) menyatakan bahwa proses ini merupakan proses oksidasi enzimatis oleh jasad mikro tertentu yang terjadi dalam dua tahap yang berkesinambungan. Tisdale *et al.* (1985) menyampaikan bahwa tahap pertama melibatkan bakteri autotrop obligat yang dikenal dengan *Nitrosomonas* dengan hasil akhir ion nitrit :



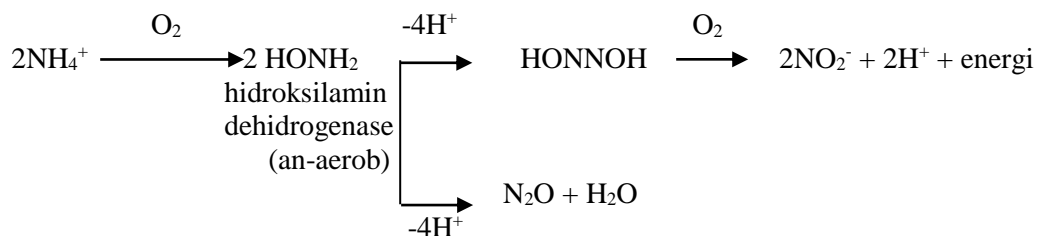
Perubahan ion nitrit menjadi ion nitrat melibatkan bakteri autotrop obligat yang dikenal dengan *Nitrobacter* sebagai berikut :



Brady (1990) lebih memperjelas reaksi nitrifikasi di atas dengan memperlihatkan terbentuknya senyawa antara (hidrosilamin dan hiponitrit) dalam proses oksidasi ion ammonium tersebut sebagai berikut :



Sedangkan Batjes dan Bridges (1992) menyampaikan bahwa proses nitrifikasi terdiri atas autotropik nitrifikasi dan heterotropik nitrifikasi. Proses autotropik nitrifikasi merupakan proses biologi aerob yang mengubah ion  $\text{NH}_4^+$  menjadi ion  $\text{NO}_3^-$ . Papan dan Rennenberg (1990); Anderson (1976); Yoshida dan Alexander (1970) dalam Batjes dan Bridges (1992) menyatakan bahwa senyawa  $\text{N}_2\text{O}$  dapat terbentuk selama proses nitrifikasi terutama dalam kondisi an-aerob, dalam hal ini telah diperlihatkan oleh *Nitrosomonas europaea* yang memproduksi  $\text{N}_2\text{O}$  selama nitrifikasi. Sedangkan Castignetti dan Hollocher (1982) memperjelas bahwa produksi  $\text{N}_2\text{O}$  selama nitrifikasi ini dibantu oleh enzim hidrosilamin-dehidrogenase dengan ragaan reaksi sebagai berikut :



Pada kondisi lapangan, produksi  $\text{N}_2\text{O}$  ini dikontrol oleh status oksigen dalam tanah, kandungan nitrogen tersedia, kadar air dan temperatur (Borden, 1986 dalam Batjes dan Bridges, 1992).



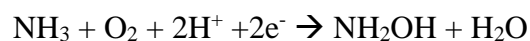
Nitrosomonas

Nitrobacter

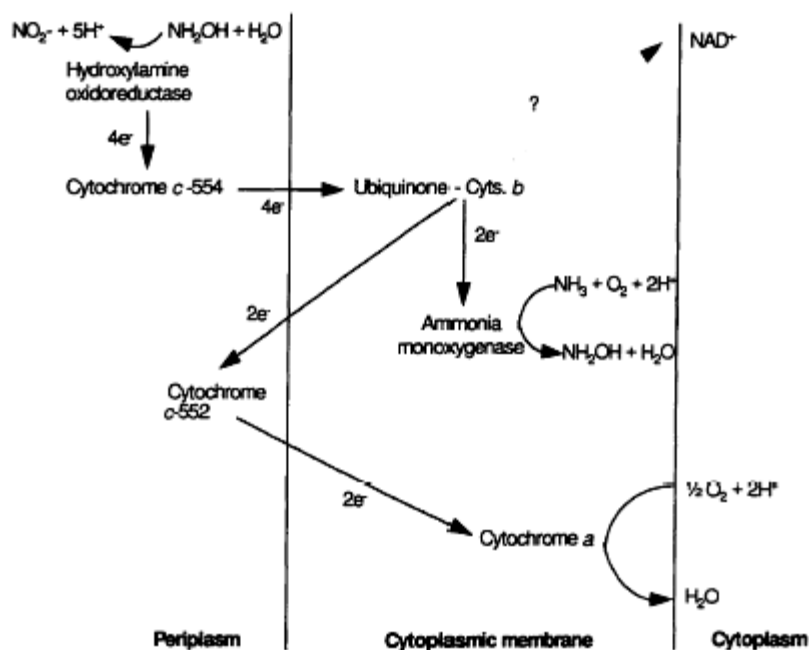
N.europaea

Gambar 18. Bakteri nitrifikasi dan pereduksi senyawa nitrit.

Rajapaksha (1997) menyatakan bahwa bakteri nitrifikasi autotropik mendapatkan energi dari proses oksidasi  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  dan karbon yang didapat secara luas dari  $\text{CO}_2$  atau senyawa karbonat. Bakteri nitrifikasi autotropik ini dapat menyesuaikan diri dengan adanya sumber donor elektron dan terminal aseptor elektron, oleh karena itu dapat bertahan pada berbagai macam habitat tanah, serta dikarenakan spesifitas luas enzim yang dikandung dalam energinya, bakteri nitrifikasi autotropik juga dapat memediasi sejumlah reaksi seperti oksidasi berbagai macam senyawa alifatik dan aromatik, serta dekomposisi senyawa senobiotik. Tahap pertama oksidasi  $\text{NH}_3$  adalah proses konversi endogenik untuk membentuk hidroksilamin sebagai berikut :

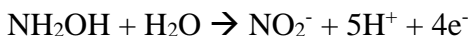


Ikatan membran yang berfungsi sebagai oksigenase yaitu ammonia monooksigenase (AMO) yang menyebabkan adanya ikatan antara setengah molekul  $\text{O}_2$  untuk setiap molekul  $\text{NH}_3$  untuk membentuk hidroksilamin sambil setengah  $\text{O}_2$  lainnya membentuk air sebagaimana ragaan di bawah ini :

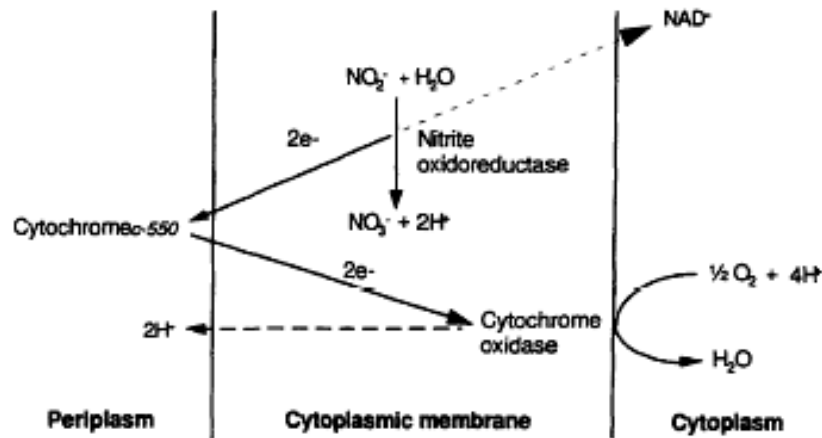


Gambar 19. Skema transport elektron di dalam  $\text{NH}_4^+$ -oxidizers.  
(Wood, 1988 *dalam* Rajapaksha, 1997)

Energi yang dihasilkan dalam proses oksidasi  $\text{NH}_3$  digunakan dalam proses oksidasi  $\text{NH}_2\text{OH}$  menjadi  $\text{NO}_2^-$  yang dikatalis oleh hidroksilamin oksidoreduktase (Yamanaka and Shinra, 1974 *dalam* Rajapaksha, 1997). Anderson dan Hooper (1983) *dalam* Rajapaksha (1997) menyatakan bahwa sebagai produk akhir,  $\text{NO}_2^-$  dibentuk oleh hidroksilamin dehidrogenase dengan penambahan satu atom  $\text{O}_2$  dari air, dengan reaksi sebagai berikut :

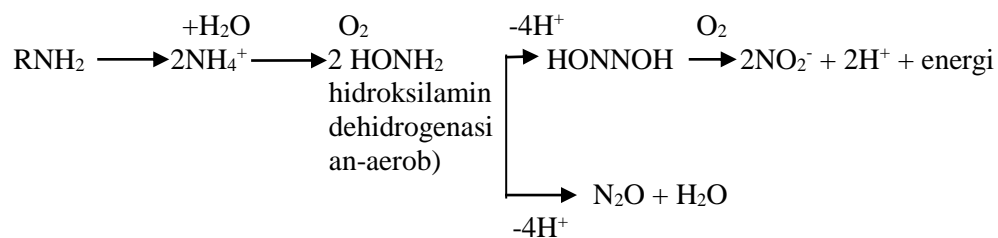


Oksidasi  $\text{NO}_2^-$  menjadi  $\text{NO}_3^-$  oleh bakteri pengoksidasi  $\text{NO}_2^-$  dikatalis oleh ikatan membran-ensim yang disebut  $\text{NO}_2^-$ -oksidoreduktase (NOR). Elektron ditransfer melalui ikatan Mo-Fe-S yang merupakan komponen NOR ke dalam periplasmik-sitokrom c-550 larut sebagaimana ragaan berikut :

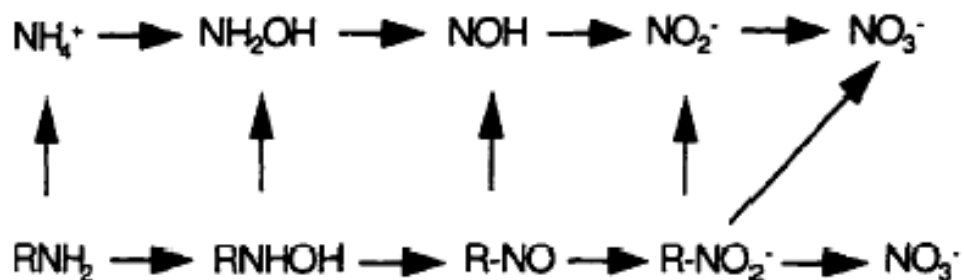


Gambar 20. Skema elektron transport di dalam  $\text{NO}_2^-$ -oxidizers.  
(Wood, 1988 dalam Rajapaksha, 1997)

Heterotropik nitrifikasi terjadi dalam kondisi aerob dan jasad mikro menggunakan karbon-organik sebagai sumber karbon dan energi. Castignetti dan Hollocher (1982) dan Papan *et al.* (1989) dalam Batjes dan Bridges (1992) menunjukkan bahwa dalam kultur bakteri nitrifikasi *Alcaligenes, sp* ternyata disamping  $\text{NO}_2^-$  dan  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  juga ditemukan. Reaksinya adalah :



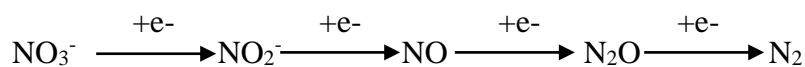
Focht dan Verstraete (1977) dalam Rajapaksha (1997) menyatakan bahwa kemungkinan kombinasi terjadinya oksidasi baik N-organik maupun N-anorganik dapat menempuh jalur sebagai berikut :



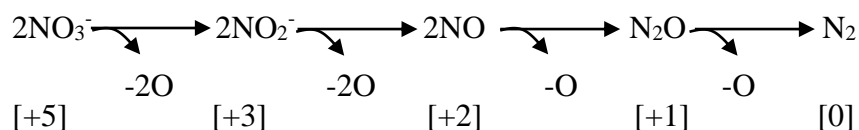
Gambar 21. Jalur nitrifikasi heterotropik.

Sejumlah senyawa organik tereduksi seperti amina, amida, oksim (RCH=NOH) dan asam hidroksiamik (RCONHOH) dapat berfungsi sebagai substrat untuk jalur organik. Senyawa – senyawa ini dapat dioksidasikan menjadi hidroksilamin, nitroso dan  $\text{NO}_3^-$  dengan memutus rantai C. Bergantung dari substrat organik yang dimanfaatkan, nitrifikasi dapat terjadi lewat jalur alternatif, dan produknya bervariasi sesuai dengan kondisi lingkungan yang ada.

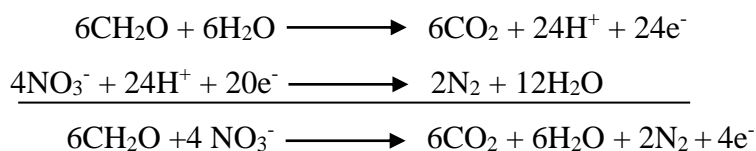
Denitrifikasi adalah proses reduksi oksida nitrogen terutama nitrit dan nitrat menjadi dinitrogen gas,  $\text{N}_2\text{O}$  dan  $\text{N}_2$  (Tiedje, 1988). Denitrifikasi terjadi di bawah kondisi tergenang yang menyebabkan situasi miskin oksigen, kandungan bahan organik tinggi yang menjadi sediaan energi serta kandungan  $\text{NO}_3^-$  tinggi. Dalam proses denitrifikasi ini nitrogen tereduksi menjadi nitrogen-gas berikut :



Senyawa nitrogen yang tereduksi juga mengalami pengurangan oksigen serta penurunan bilangan oksidasi :



Dalam suasana an-aerob bakteri an-aerob fakultatif dapat menggunakan ion  $\text{NO}_3^-$  menggantikan oksigen sebagai aseptor elektron/hidrogen dalam proses respirasi sebagai berikut :

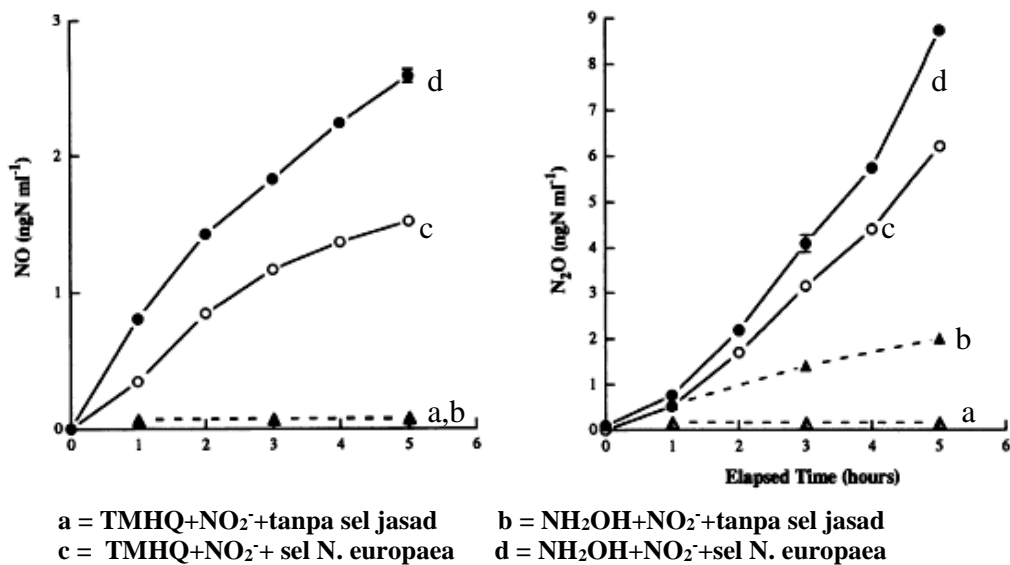


Selanjutnya Barber (1984) serta Batjes dan Bridges (1992) menyatakan bahwa tingkat denitrifikasi dipengaruhi oleh pH tanah, aerasi, temperatur dan aras (*level*) bahan organik yang dapat terdekomposisi. Terdapat hubungan linier antara pH tanah dan tingkat denitrifikasi. Dalam kondisi asam proses denitrifikasi akan menurun, dan akan meningkat seiring dengan peningkatan pH tanah. Penurunan oksigen dalam tanah akan membutuhkan keberadaan ion nitrat sebagai pengganti aseptor elektron. Pada kondisi-kondisi kelebihan air yang menyebabkan penurunan aerasi dapat meningkatkan denitrifikasi, jadi ada hubungan linier yang



bersifat negatif (berkebalikan) antara proses denitrifikasi dan prosentase pori-pori aerasi dalam tanah. Sedangkan pada peningkatan suhu dapat meningkatkan proses denitrifikasi. Bahan organik merupakan donor elektron di dalam tanah, oleh karenanya dengan semakin meningkatnya kandungan bahan organik yang siap didekomposisikan (bahan organik segar), maka denitrifikasi akan meningkat.

Menurut Anderson *et al.* (1993) NO dan N<sub>2</sub>O adalah senyawa yang diproduksi oleh keragaman luas jasad mikro, termasuk penitrifikasi autotropik (*autotrophic nitrifiers*) dan penitrifikasi heterotropik (*heterotrophic nitrifiers*) (termasuk bakteri dan jamur). Percobaan yang telah dilakukannya mencoba untuk membandingkan produksi NO dan N<sub>2</sub>O oleh penitrifikasi autotropik (*Nitrosomonas europaea*) dan penitrifikasi heterotropik (*Alcaligenes faecalis*). Dalam percobaan kultur terkendali ini digunakan donor elektron alam NH<sub>2</sub>OH dan donor elektron tiruan *trimethylhydroquinone* (TMHQ), serta kultur jasad mikro ini ditumbuhkan dalam suasana an-aerobik maupun aerobik. Hasil percobaan disajikan dalam gambar berikut :

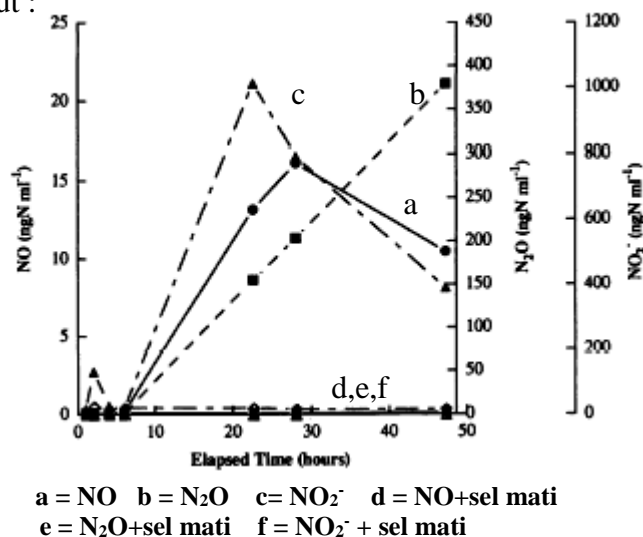


Gambar 22. Produksi NO dan N<sub>2</sub>O dalam kultur an-aerobik *N. europaea*.

Gambar 22 memperlihatkan bahwa tanpa adanya kehadiran *Nitrosomonas europaea*, produksi NO bisa dikatakan tidak ada, sedangkan dalam kultur yang mengandung jasad mikro tersebut serta adanya donor elektron dapat meningkatkan aktivitas *N. europaea* dan hal ini dapat dilihat dari proses reduksi senyawa nitrit yang dimasukkan akan menjadi NO. Sedangkan produksi N<sub>2</sub>O

tinggi ditunjukkan oleh kultur yang berisi *N. europaea* serta donor elektron (TMHQ maupun  $\text{NH}_2\text{OH}$ ) dan jasad mikro menjadikan senyawa nitrit sebagai aseptor elektron.

Dalam suasana aerobik akan terjadi sekaligus proses nitrifikasi untuk menghasilkan  $\text{NO}_2^-$  dan denitrifikasi yang menghasilkan NO dan  $\text{N}_2\text{O}$  oleh *Alcaligenes faecalis*. Pada percobaan berikutnya, ke dalam kultur disamping dimasukkan sel jasad (hidup dan mati) juga dimasukkan  $\text{NH}_4^+$  sebagai sumber N dan larutan medium denitrifikasi yang berisi sitrat. Hasil percobaannya disajikan dalam gambar berikut :



Gambar 23. Produksi NO, N<sub>2</sub>O dan NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – dalam kultur aerobik *A. faecalis*.

Dalam suasana aerobik dan adanya  $\text{NH}_4^+$  menyebabkan pembentukan senyawa nitrit oleh aktivitas *Alcaligenes faecalis* dapat berjalan lancar. Reduksi nitrit menjadi NO sampai dengan kira – kira 30 jam masa inkubasi mencapai produk tertinggi. Reduksi NO menjadi N<sub>2</sub>O sampai dengan akhir masa inkubasi masih menunjukkan peningkatan. Proses oksidasi  $\text{NH}_4^+$  menjadi nitrit sampai kira kira menjelang 20 jam masa inkubasi menunjukkan peningkatan, tetapi kemudian mengalami penurunan yang mungkin disebabkan oleh proses reduksi senyawa tersebut menjadi NO dan N<sub>2</sub>O sebagai hasil akhir. Kultur yang berisi sel mati jasad *A. faecalis* tidak menunjukkan adanya produksi ketiga senyawa tersebut.

#### IV. PENUTUP

Tanah merupakan medium tumbuh tanaman yang paling banyak menentukan produksi tanaman. Tanah merupakan medium tumbuh yang memiliki sistem yang tercipta karena adanya proses interaksi antara sifat - sifat biologi, kimia dan fisika tanah yang akhirnya menentukan kualitas tanah. Atas dasar inilah maka tanah tidak lagi dipandang sebagai sekadar medium tumbuh saja, tetapi dikarenakan proses yang berlangsung di dalamnya, tanah telah dipandang menjadi sebuah sistem kehidupan yang banyak berpengaruh kepada tingkat keberhasilan pertanaman. Secara fungsional, kualitas tanah akan memberikan sumbangan kesehatan kehidupan bagi semua proses yang bertumpu padanya. Bukan saja dalam bidang pertanian dan pola hubungan fungsional tanah-tanaman saja, tetapi dalam skala yang lebih luas misalnya lingkungan, maka kesehatan tanah pada prinsipnya mempengaruhi ekosistem yang ada dalam biosfer.

Ruang yang ditempati sistem interaksi tanah-tanaman adalah rizosfer yaitu ruang spesifik dalam tanah yang dipengaruhi oleh sistem perakaran dan eksudat metabolik yang dikeluarkan akar, sehingga perbaikan kualitas interaksi antara tanah-tanaman secara menguntungkan tanpa harus menimbulkan dampak negatif kepada lingkungan, lebih banyak bertumpu kepada kesehatan rizosfer. Di dalam rizosfer terdapat sistem kehidupan yang dibangun oleh adanya aktivitas jasad mikro yang membutuhkan substrat organik, baik yang berasal dari bahan organik maupun eksudat akar. Jasad dalam tanah ini terdiri dari flora dan fauna yang membentuk lingkup hayati yang banyak berpengaruh pada siklus dan penyediaan hara tanaman. Proses – proses tersebut antara lain :

- a. Fiksasi nitrogen baik secara simbiotik lewat tanaman legume maupun non-simbiotik yang berasal dari proses dekomposisi bahan organik dalam tanah.
- b. Perubahan bentuk nitrogen tanah yang terdiri dari proses mineralisasi N-organik menjadi N-ammonium, nitrifikasi yang merupakan proses oksidasi senyawa ammonium menjadi nitrit dan nitrat, serta denitrifikasi yaitu perubahan senyawa nitrat menjadi oksida nitrogen dan nitrogen-elemental.
- c. Oksidasi dan reduksi hara sulfur, besi dan mangan.

- d. Perubahan dan pelepasan karbon baik dalam bentuk CO<sub>2</sub> C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> maupun CH<sub>4</sub>.

Walaupun belum ada kesepakatan tentang komposisi atmosfer, tetapi peran dan fungsi atmosfer bagi biosfer telah lama diketahui (Sprent and Sprent, 1990). Salah satu peran terpenting adalah penyediaan beberapa unsur terutama nitrogen, karbon, hidrogen, oksigen, sulfur dan unsur lain yang dibutuhkan bagi keberlangsungan kehidupan jasad di dalam biosfer. Tanah sebagai satu – satunya gudang hara dan air di permukaan bumi serta memiliki berbagai tingkatan proses biologi yang kompleks berperan penting dalam proses transformasi hara agar dapat dimanfaatkan makhluk hidup di permukaan bumi. Oleh karena itulah kekuatan biologi tanah (*soil biological power*) sebagai reaktor biologi di alam harus selalu diteliti dan dieksplorasi secara bijaksana tanpa harus menimbulkan dampak negatif kepada lingkungan.

#### DAFTAR BACAAN

- Anderson, I.C., Poth, M., Homstead, J. and Burdige, D. 1993. *A Comparison of NO and N<sub>2</sub>O Production by Autotrophic Nitrifier Nitrosomonas europaea and the Heterotrophic Nitrifier Alcaligenes faecalis*. Journal of Applied and Environmental Microbiology Vol. 59 No. 11 : 3525 – 3533.
- Arias, M.E., Gonzales-Perez, J.A., Gonzales-Vila, F.J. and Ball, A.S. 2005. *Soil Health a New Challenge for Microbiologist and Chemists*. International Microbiologi. Vol. 8: 13-21.
- Bais, H.P., Weir, T.L., Perry, L.G., Gilroy, S., and Vivanco, J.M. 2006. *The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms*. Annual Review of Plant Biology Vol. 57 : 233 – 266.
- Barber, S.A. 1984. *Soil Nutrient Bioavailability a Mechanistic Approach*. A Wiley Interscience Publ. John Wiley & Sons. New York : 160-176.
- Batjes, N.H. and Bridges, E.M. 1992. *A Review of Soil Factors and Processes that Control Fluxes of Heat, moisture and Greenhouse Gases*. International Soil Reference and Information Centre. Technical Paper 23. Wageningen: 70-73.
- Bending, G.G., Turner, M.K., and Jones, J.E. 2002. *Interaction between Crop Residues and Soil Organic Matter Quality and the Functional Diversity of Soil Microbial Communities*. Journal of Soil Biology & Biochemistry Vol. 34 : 1073 – 1082.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A. 1985. *Soil Chemistry* 2<sup>nd</sup> –ed. A Wiley Interscience Pub. John Wiley & Sons. New York : 26-324.
- Brady, N.C. 1990. *The Nature and the Properties of Soils* 10<sup>th</sup>-ed. MacMillan Publ. Co. New York : 9 – 11; 253 – 336.

- Brooks, M.L. 2003. *Effect of Increased Soil Nitrogen on the Dominance of Alien Annual Plants in the Mojavo Desert*. <http://www.werc.usage.gov>. Diakses September 2005.
- Castignetti, D. and Hollocher, T.C. 1982. *Nitrogen Redox Metabolism of a Heterotrophic, Nitrifying-Denitrifying Alcaligenes, sp. from Soil*. Journal of Applied and Environmental Microbiology. Vol.44, no.4:923-928.
- Doran, J.W. and Safley, M. 1997. *Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity in Biological Indicators of Soil Health*. CAB International. UK : 1-28.
- Elliott, E.T. 1997. *Rationale for Developing Bioindicators of Soil Health*. in Biological Indicators of Soil Health. CAB International. UK : 49 - 78.
- Graham, P.H. 1982. *Plant Factors Affecting Symbiotic Nitrogen Fixation in Legumes* in Biological Nitrogen Fixation Technology for Tropical Agriculture. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colombia : 27 - 37.
- Hassett, J.J. and Banwart, W.L. 1992. *Soil and Their Environment*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey: 186-189, 241-244, 256-271.
- Hesse, P.R. 1971. *Soil Chemical Analysis*. Chemical Publ. Co. New York : 149-169.
- Kara Emine, E. 2000. *Effects of Some Plant Residues on Nitrogen Mineralization and Biological Activity in Soils*. Turk Journal for Agriculture Vol. 24 : 457 - 460.
- Kondo, M. and Yasuda, M. 2003. *Seasonal Changes in N<sub>2</sub> Fixation Activity and N Enrichment in Paddy Soils as Affected by Soil Management in Northern Area of Japan*. JARQ Vol. 37 (2): 105 - 111.
- Marchner, H. 1986. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Institute of Plant Nutrition. Univ. of Hohenheim. Germany : 195-200.
- Nanniperi, P., cher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G. and Renella, G. 2003. *Microbial Diversity and Soil Functions*. European Journal of Soil Sci. Vol. 23 : 655-670.
- NRCS. 2004. *Soil Biology and Land Management*. Soil Quality and Soil Biology Technical Note No. 4. 20p. <http://soil.usda.gov/sqi>. Diakses Juli 2007.
- Peoples, M.B., Ladha, J.K., and Herridge, D.F. 1995. *Enhancing Legume N<sub>2</sub> Fixation through Plant and Soil Management*. Journal of Plant and Soil Vol. 174 : 83 - 101.
- Rajapaksha, R.M.C.P. 1997. *Nitrification at the Community Level Across a Cultivated and a Pasture Landscape*. National Library of Canada. 175p.
- Saito Masanori. 2003. *Can Soil Biodiversity be Used for an Indicator of Soil Health?*. Case Studies in Japan. Dept. Of Environmental Chemistry. National Institute of Agro-Environmental Sciences. Japan. [Webdomino1.aced.org/comnet/agr/soil\\_ero\\_bio.nst](http://webdomino1.aced.org/comnet/agr/soil_ero_bio.nst) Diakses Juni 2007.
- Sprent, J.I. and Sprent, P. 1990. *Nitrogen Fixing Organisms, Pure and Applied Aspects*. Chapman and Hall. London. 256p.
- Tiedje, J.M. 1988. Ecology of Denitrification and Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium in Biology of Anaerobic Microorganisms edited by Zehnder, A.J.B : 179-183.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. and Havlin, J.L. 1993. *Soil Fertility and Fertilizers* 5<sup>th</sup>-ed. Macmillan Publ. Co. New York: 109-173, 568-573.

- Werner, D. 1992. *Symbiosis of Plants and Microbes*. Chapman & Hall. London : 20 – 32.
- Wolfe, D. 2003. *Soil Health Assessment and Management; The Concepts*. Cornell University, Ithaca. New York. 5p.
- Wynne, J.C., Ball, S.T., Elkan, G.H., Isleib, T.G., and Schneeweis, T.J. 1982. *Host-plant Factors Affecting Nitrogen Fixation of The Peanut* in Biological Nitrogen Fixation Technology for Tropical Agriculture. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colombia : 67 – 75.