



PERANAN MIKROBA ENDOFIT SEBAGAI AGENS HAYATI DALAM Mendukung Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Oleh:

Dr. Ir. Abdul Munif, MSc.Agr.

Departemen Proteksi Tanaman, Fakultas pertanian IPB

ABSTRAK

Mikroba endofit adalah mikroba yang berada dalam jaringan tanaman yang sehat, tidak menimbulkan penyakit atau gejala pada tanaman inangnya, tidak merugikan tanaman inangnya dan mikroba tsb dapat diisolasi atau diekstraksi melalui teknik sterilisasi permukaan. Mikroba endofit bersifat non patogenik. Hal ini telah disepakati sejak mikroba endofit pertama kali dilaporkan oleh Darnel et al (1904), para peneliti sepakat bahwa mikroba endofit adalah mikroba yang hidup dalam jaringan internal tumbuhan hidup tanpa menyebabkan efek negatif langsung yang nyata. Sifat mikroba endofit yang tidak berdampak negatif pada jaringan tumbuhan menunjukkan kemungkinan adanya hubungan simbiosis mutualisme antara mikroba endofit dan inangnya. Mikroba endofit yang terdapat dalam jaringan tanaman meliputi cendawan, actinomycetes dan bakteri.

PENDAHULUAN

Ada beberapa definisi mikroba endofit. Definisi mikroba endofit menurut Kloepper et al (1999) adalah mikroorganisme yang berada dalam jaringan pembuluh tanaman dan dapat bergerak bebas di dalam tanaman atau lebih luas lagi mikroorganisme yang berada dalam jaringan tanaman walaupun tidak melakukan kolonisasi. Menurut Stone et al (2000) mikroba endofit adalah organisme yang menginfeksi jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala (*symptomless*) dan kolonisasi organisme tersebut dapat dibuktikan dalam tanaman.

Strobel dan Daisy (2003) mendefinisikan bakteri endofit adalah bakteri yang menghabiskan sebagian atau seluruh siklus hidupnya dengan mengkolonisasi inter dan atau intraseluler jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala yang nyata atau penyakit. Menurut Zinniel et al. (2002) mikroba endofit adalah mikroba yang hidup di dalam jaringan pada periode tertentu dan mampu hidup dengan membentuk koloni dalam jaringan tanaman tanpa

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengurniakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



membahayakan inangnya. Hampir di semua jaringan tanaman yang sehat terdapat banyak mikroorganisme endofit.

Secara praktis, Hallmann et al. (1997) mendefinisikan adalah semua bakteri yang dapat diisolasi atau diekstraksi dari dalam jaringan tanaman melalui teknik sterilisasi permukaan (*Surface disinfested plant tissue*) dan tanaman tersebut tidak menunjukkan gejala sakit.

Bakteri endofit dan interaksinya dengan Tanaman

Studi molekuler terbaru mengenai keragaman bakteri endofit telah menemukan kekayaan yang sangat besar dari spesies bakteri tersebut. Endofit memicu pertumbuhan dan produksi tanaman, menekan patogen penyebab penyakit pada tanaman, dapat membantu menghilangkan kontaminan, melarutkan posfat, atau membuat nitrogen dapat diasimilasi oleh tanaman. Beberapa endofit bersifat *seedborne* dan endofit lainnya memiliki mekanisme untuk membentuk kolonisasi pada tanaman. Mutan bakteri yang tidak mampu untuk menghasilkan protein juga memiliki kemampuan yang rendah dalam membentuk kolonisasi. Gen-gen tanaman yang muncul oleh karena adanya endofit menjadi petunjuk adanya efek endofit pada tanaman. Analisis molekuler membuktikan bahwa respon pertahanan tanaman membatasi populasi bakteri didalam tanaman. Beberapa patogen pada manusia, seperti *salmonella* spp, sudah terbukti bersifat endofit dan bakteri-bakteri ini tidak hilang dengan disinfektan yang biasanya memusnahkan bakteri di permukaan. Penyebaran endofit ke lingkungan atau areal pertanian harusnya dievaluasi secara hati-hati untuk menghindari patogen-patogen baru.

Tanaman dan hewan umumnya berhubungan dengan banyak mikroorganisme. Di dalam usus, bakteri memiliki peran yang sangat baik untuk merangsang kekebalan dan perkembangan (Hooper et al. 2001). Sama halnya bakteri tanaman merangsang respon pertahanan (de Matos Nogueira et al. 2001). Bakteri di akar dan di rizosfer mengambil makanan dengan lendir yang dihasilkan dari akar yang busuk, namun beberapa bakteri dan cendawan mampu masuk ke dalam tanaman sebagai endofit yang tidak menyebabkan penyakit dan mampu membentuk hubungan yang mutualisme (Hallmann et al. 1997; Peroti 1926). Tanaman memiliki *niche* (kondisi/lingkungan yang baik untuk tempat tumbuh) yang beragam untuk organisme endofit. Bakteri endofit sudah diisolasi dari banyak spesies tanaman sebagaimana yang telah di review Struz et al. (2000). Tanaman-tanaman yang dilaporkan bersifat endofit ditunjukkan di table 1,

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**



namun kebanyakan yang terjadi tidak ada satu spesies tanaman yang benar-benar bebas dari endofit. Sedikitnya contoh yang diperoleh dari populasi mungkin dikarenakan beberapa mikroorganisme tidak mudah diisolasi atau dikulturkan.

Pada umumnya, didalam populasi, bakteri endofit muncul dengan kepadatan yang rendah dibandingkan dengan bakteri rizosfer atau bakteri patogen (Hallmann et al. 1997). Namun belum diketahui apakah tanaman lebih diuntungkan dengan bakteri endofit atau dengan bakteri rizosfer atau mana yang lebih menguntungkan bagi bakteri itu sendiri, menjadi endofit atau menjadi bakteri rizosfer?. Tidak selalu jelas populasi mikroorganisme yang mana (bakteri endofit atau bakteri rizosfer) yang mempercepat pertumbuhan, meskipun demikian, keuntungan yang diberikan oleh endofit lebih dikenal dan akan dibahas disini.

Populasi endofit, seperti halnya populasi bakteri rizosfer dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik (Fuentes-Ramirez et al. 1999; Hallmann et al. 1997; Seghers et al. 2004), namun bakteri endofit dapat lebih terlindungi dari stres biotik dan abiotik dibandingkan dengan bakteri rizosfer (Hallmann et al. 1997).

Bakteri endofit didalam satu tanaman inang tidak terbatas pada satu spesies bakteri saja namun terdiri dari beberapa genus dan spesies. Tidak satu pun yang tahu apakah komunitas bakteri yang berbeda tersebut saling berinteraksi satu sama lain, dan spekulasi menyebutkan bahwa efek positif tersebut merupakan hasil kombinasi efek dari aktivitas bakteri-bakteri tersebut. Di review ini, pertama kali akan dikemukakan keragaman endofit. Namun sayang, beberapa paper awal yang menjelaskan bakteri didalam tanaman ternyata menggunakan metode yang tidak memberikan klasifikasi yang akurat mengenai bakteri endofit.

Kriteria untuk dapat mengenali bakteri endofit yang sebenarnya sudah dipublikasikan (Reinhold-Hurek 1998a) dan hal ini memerlukan tidak hanya isolasi dari jaringan yang sudah didisinfeksi permukaan, tetapi juga membutuhkan bukti mikroskop agar dapat memvisualisasikan bakteri yang "melekat" didalam jaringan tanaman. Kriteria yang terakhir tidak selalu dapat dilakukan. Pemanfaatan endofit putative sudah direkomendasikan untuk bakteri-bakteri endofit yang tidak dapat dikonfirmasi melalui mikroskop. Endofit yang sebenarnya juga dapat dikenali dengan kemampuannya menginfeksi kembali benih yang telah didisinfeksi.

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati"
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan" di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Bakteri endofit dapat ditelaah umumnya setelah proses pengkulturan di media laboratorium, namun pendekatan yang lebih komplet sedang dikerjakan, menggunakan metode yang tidak perlu mengkulturkan bakteri dan memanfaatkan analisis sekuens gen-gen bakteri yang diperoleh dari DNA yang diisolasi dari jaringan tanaman bagian dalam (Engelhard et al. 2000; Miyamoto et al. 2004; Reiter et al. 2003; Sessitsch et al. 2002b). Pendekatan molekuler yang mempelajari endofit gandum di Australia memperlihatkan keragaman yang besar dari aktinobakteri dibandingkan dengan studi yang mengkulturkan endofit (Conn dan Franco 2004). Bukti bahwa terdapat bakteri endofit yang belum dikultur juga diperoleh dari studi mengenal endofit jeruk dengan melakukan denaturasi profil gel elektroforesis dari fragmen gen rRNA 16S yang di amplifikasi dari DNA total tanaman. Beberapa pita DNA tidak sesuai dengan semua bakteri yang telah diisolasi (Araujo et al. 2002). Sebaliknya, tidak ada perbedaan yang diperoleh dengan metode kultur atau tanpa kultur dan keduanya memperlihatkan bakteri yang sama dari genus *Pseudomonas* dan *Rahnella* di benih pinus (Cankar et al. 2005)

Bakteri endofit dan manfaatnya terhadap tanaman

Pengaruh pertumbuhan oleh mikroorganisme bisa merupakan hasil dari adanya fiksasi nitrogen (Hurek et al. 2002; Iniguez et al. 2004; Sevilla et al. 2001) atau pembentukan fitohormon, biokontrol fitopatogen didalam zona akar (melalui pembentukan agen anticendawan atau antibakteri, pembentukan siderophore (molekul yang mengikat dan mengangkut besi di dalam mikroorganisme), kompetisi nutrisi dan induksi SARm, atau kekebalan) atau dengan meningkatkan ketersediaan mineral (Sessitsch et al. 2002a; Struz et al. 2000). Penjelasan mekanisme yang memicu pertumbuhan tanaman akan membantu untuk menemukan spesies dan kondisi yang memberikan keuntungan bagi tanaman. Substansi volatil (yang mudah menguap) seperti 2-3 butadienol dan acetin yang dihasilkan oleh bakteri tampaknya merupakan mekanisme yang paling baru ditemukan yang terlibat didalam pertumbuhan tanaman yang cepat (Ryu et al. 2003). Akan sangat bermanfaat jika kita dapat mengetahui apakah substansi volatil tersebut dapat dihasilkan didalam jaringan tanaman. Endofit menghasilkan edenin ribosida yang memicu pertumbuhan dan mengurangi terjadinya browning pada jaringan tanaman pinus (Pirttila et al. 2004).



Bakteri endofit pada tanaman red clover diduga memberikan efek alelopati terhadap tanaman jagung, yang menyebabkan menurunnya jumlah kecambah dan tinggi tanaman (Struz dan Christie 1996). Karena alasan ini, di Kanada tidak disarankan menanam jagung bersama-sama dengan red clover. Bakteri endofit tanaman clover menghasilkan efek berbahaya bagi tanaman jagung. Akan lebih meyakinkan apabila peneliti dari studi tersebut menguji efek tanaman clover dengan dan tanpa endofit terhadap perkecambahan dan perkembangan tanaman jagung.

Bakteri endofit mampu melakukan supresi terhadap perkembangan biakan nematoda dan hal ini dapat memberikan keuntungan tanaman budidaya yang lain yang dirotasi dengan tanaman inang tersebut (Struz dan Kimpinski 2004). Isolasi *Curtobacterium flaccumfaciens* sebagai endofit yang diperoleh dari tanaman jeruk yang tidak menimbulkan gejala ketika diinfeksi dengan parogen *Xylella fastidiosa* membuktikan bahwa bakteri endofit dapat membantu tanaman jeruk untuk membentuk ketahanan yang lebih baik terhadap infeksi patogen (Araujo et al. 2002). Endofit dari tanaman kentang memperlihatkan aktivitas antagonis terhadap cendawan (Sessitsch et al. 2004). Dan juga menghambat patogen bakteri yang termasuk ke dalam genus *Erwinia* dan *Xanthomonas*. Beberapa isolat endofit menghasilkan antibiotik dan siderofore didalam kondisi in vitro (Sessitsch et al. 2004).

Penghambatan patogen layu pada tanaman oak *Ceratocystis fagacearum* ditemukan dari 183 bakteri endofit dari 889 isolat yang diuji (Brooks et al. 1994). Dari 2648 isolat bakteri yang dianalisa dari rizosfer, filosfer, endosfer dan endorhiza, hanya satu endofit akar yang dikenal dengan *Serratia plymuthica* sangat efektif sebagai antagonis cendawan (Berg et al. 2005a), aktinobakteri endofit adalah antagonis yang efektif dari cendawan patogenik *Gaeumannomyces graminis* di tanaman gandum (Coombs et al. 2004) dan beberapa endofit terlihat antagonis terhadap *Rhizoctonia solani* (Parmeela dan Johri 2004). Namun sangat perlu diingat bahwa pada umumnya percobaan untuk menguji antagonisme dilakukan secara in vitro dan masih perlu ditentukan apakah pengujian tersebut berkorelasi dengan efeknya di alam.

Aplikasi di masa mendatang sebaiknya mempertimbangkan pemanfaatan endofit hasil rekayasa genetika dengan potensi pengendalian biologis pada tanaman budidaya,. Endofit *Herbaspirillum serope diceae* dan *Clavibacter xylii* sudah direkayasa agar mampu menghasilkan

Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



dan mensekresi δ -endotoksin dari *Bacillus thuringiensis* untuk mengendalikan serangga (Downing et al. 2000; Turner et al. 1991).

Di tanaman, bakteri pendegradasi senyawa rekalsitran lebih banyak dijumpai diantara populasi bakteri endofit dibandingkan di populasi rizosfer (Siciliano et al. 2001), yang dapat berarti bahwa endofit memiliki peran dalam memetabolisme substansi ini. Strain endofit *Burkholderia cepacia* hasil rekayasa mampu meningkatkan fiteromediasi dan merangsang ketahanan tanaman terhadap toluene (Barac et al. 2004). Saat ini, minat penelitian untuk melakukan rekayasa genetic terhadap endofit semakin meningkat (Andreote et al. 2004). Keuntungan dan rintangan dalam menggunakan endofit yang telah direkayasa perlu dibahas dengan lebih dalam (van der Lelie et al. 2004).

Bakteri endofit memiliki kemampuan untuk melarutkan posfat dan diduga bakteri endofit dari kedelai kemungkinan berperan juga didalam asimilasi posfat (Kuklinsky-Sobral et al. 2004). Tanaman tebu Brazil ditanam bertahun-tahun dengan memakai sedikit pupuk tanpa menunjukkan gejala kekurangan N. meskipun banyak endofit pengikat N_2 diisolasi dari tanaman tebu, namun belum jelas endofit yang mana yang mampu mengikat N di dalam jaringan tanaman. Meskipun demikian, ada kontroversi mengenai level N yang terfiksasi oleh endofit dan proporsinya pada tanaman (Giller dan Merck 2003). Perhitungan ini sangat bervariasi pada laporan yang berbeda-beda dan berkisar dari 30 sampai 80 kg N/ha/tahun (Boddey et al 1995). Pada kondisi optimal, beberapa genotype tanaman kelihatannya memperoleh kebutuhan N dari fiksasi nitrogen.

Rumput Kallar mampu tumbuh pada tanah yang miskin N di Pakistan dan dari rumput tersebut ditemukan *Azoarcus* spp yang beragam (Reinhold-Hurek et al. 1993). Didalam tanaman gandum, *Klebsiella sp. Strain kp342* mengikat N_2 (Ingiuez et al. 2004), dan sudah ada laporan bahwa strain ini meningkatkan produksi jagung di areal pertanian (Riggs et al. 2001). Sama halnya, endofit yang mengikat nitrogen tampaknya mampu memperbaiki kekurangan N dari ubi manis (*Ipomoea batatas*) di dalam tanah yang miskin N (Reiter et al. 2003).

Rumput yang tumbuh pada pasir yang miskin hara mengandung spesies dari genus *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* serta *Burkholderia*. tampaknya endofit *Burkholderia* mampu menyumbangkan N ke tanaman rumput tersebut, karena nitrogenase terdeteksi dengan antibody di akar didalam dinding sel dari batang dan rizoma (Dalton et al. 2004).

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Beberapa penelitian diarahkan untuk meningkatkan produksi di berbagai tanaman setelah aplikasi dengan bakteri endofit. Untuk melihat efek endofit, percobaan inokulasi sudah dilakukan, namun muncul masalah untuk menghilangkan endofit asli atau yang sudah ada didalam tanaman agar memperoleh benih atau tanaman yang bebas bakteri. Fungsi berlebihan dari endofit asli dan inokulum yang ditambah dapat membatasi efek yang diamati dari inokulasi. Interaksi komunitas bakteri dengan tanaman yang sangat rumit, lemahnya kompetensi rizosfer dengan mikroorganisme endogen (Sturz et al. 2000) dan fluktuasi bakteri dengan kondisi lingkungan juga dapat membatasi didalam aplikasi inokulasi endofit di lapang (Struz dan Nowak 2000). Selain itu, di lapang, bakteri tanah yang sangat beragam dan melimpah dapat menjadi sumber bagi banyak endofit dan, untuk ini, efek inokulasi mungkin tidak akan terlihat. Oleh karena disinfeksi permukaan tidak menghilangkan endofit, maka prosedur seperti pemanasan dan pengeringan benih masih dianggap sebagai cara yang mampu untuk menghilangkan populasi bakteri di dalam (Holland dan Polacco 1994). Kultur jaringan selama ini juga merupakan cara yang dianggap mampu menghilangkan atau mengurangi endofit (Holland dan Polacco 1994; Leifert et al. 1994). Inokulan kelihatannya dapat tumbuh dengan baik didalam tanaman, hasil mikropropagasi, disebabkan sedikitnya atau bahkan tidak ada sama sekali mikroorganisme yang berkompetisi dengannya. Bisa terdapat keuntungan yang sangat banyak melalui inokulasi mikroorganisme kedalam campuran dengan sedikit tanah dimana tanaman ditransplantasi pada tahap awal pertumbuhannya. Di kasus seperti ini, ketika plantet diinokulasi, tanaman tersebut menjadi lebih vigor dan memiliki ketahanan yang meningkat terhadap kekeringan dan patogen, menurunnya shock akibat transplanting, dan rendahnya kematian (Barka et al. 2000; Martinez et al. 2003; Sahay dan Varma 1999).

Interaksinya secara Molekuler

Berlawanan dengan informasi ekstensif mengenai mekanisme molekuler dari interaksi tanaman dengan bakteri lainnya (Lugtenberg et al. 2002; Oldroyd dan Downie 2004), data yang ada hanya terbatas pada interaksi molekuler inang dengan endofit.

Respon tanaman terhadap endofit tampaknya disesuaikan dengan kondisi yakni sesuai dengan genotip tanaman. Ras liar dan beberapa varietas tanaman tampaknya memberikan kondisi didalam tanaman yang cukup baik yang merangsang dan mendukung

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengurnikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



fiksasi nitrogen oleh endofit dan mendapat keuntungan dari tanaman tersebut. Hal ini sudah diamati dengan padi, tanaman tebu dan jagung (Boddey et al. 1995; Engelhard et al. 2000; Gutierrez-Zamora dan Martinez-Romero 2001; Iniguez et al. 2004; Reis et al. 1994; Shrestha dan Ladha 1996; Urquiaga et al. 1989).

Gen-gen tanaman dapat dimodulasi oleh adanya bakteri dan gen-gen sehingga memberikan petunjuk dari efek endofit didalam tanaman. Di tanaman tebu, gen-gen yang terekspresikan sebagai respon terhadap koloni endofit *Gluconacetobacter diazotrophicus* dan *Herbaspirillum rubrisulbalbicans* sudah ditelaah (de Matos Nogueira et al. 2001). Analisis sekuen cDNA dan pustaka genom lainnya hasil dari RNA messenger yang terekspresi di tanaman tebu pada saat diinokulasi dengan *Gluconacetobacter diazotrophicus* dan *Herbaspirillum rubrisulbalbicans* mengungkapkan bahwa terjadi induksi gen-gen untuk asimilasi nitrogen, untuk metabolisme karbon, untuk pertumbuhan serta gen untuk pertahanan tanaman yang terbatas (de Matos Nogueira et al. 2001). Strategi yang sama dapat ditakukan untuk mempelajari efek endofit lainnya di tanaman.

Arabidopsis thaliana telah digunakan sebagai tanaman model untuk mempelajari interaksinya dengan endofit seperti *Azorhizobium caudonodans* dan enterobakteri. Keuntungan dari menggunakan *Arabidopsis thaliana* adalah bahwa terdapat mutan yang jelas yang dapat diuji untuk kolonisasinya oleh bakteri endofit. Iniguez dkk (2005) menggunakan mutan *Medicago truncatula* dan *Arabidopsis thaliana* untuk menentukan peran lintasan respon pertahanan tanaman dalam meregulasi jumlah bakteri endofit. Mereka menemukan bahwa etilen, molekul sinyal untuk ISR di tanaman, dapat menurunkan kolonisasi endofit strain *Klebsiella Kp342* dan *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* (*Salmonella typhimurium*). Mutan *Medicago truncatula* yang tidak peka terhadap etilen mengalami hiperkoloni oleh *Kp342*, sementara penambahan prekursor etilen asam 1-amino-cyclopropane-I-karboksilat kepada *Medicago truncatula* dan gandum mengurangi jumlah bakteri endofit. Dengan memberi perlakuan inhibitor etilen 1-metilsiklopropane kepada tanaman, dapat memulihkan koloni. Iniguez dkk (2005) juga menemukan bahwa adanya komponen ekstraseluler bakteri, seperti flagella dan sistem sekresi tipe III (TTSS-SP11) *Salmonella pathogenicity 1* menurunkan koloni endofit, dan mutan-mutan *Salmonella typhimurium* yang tidak memiliki komponen ini memiliki koloni endofit yang lebih tinggi didalam kecambah *Medicago sativa*

Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.

- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



dan gandum. Mutan *Arabidopsis thaliana* menunjukkan bahwa hanya respon pertahanan tanpa asam salisilat (SA yang berperan pada koloni *Klebsiella* sp. strain Kp342. Pada kasus kolonisasi oleh *Salmonella typhimurium*, hal ini terjadi pada lintasan yang bergantung pada SA dan lintasan tanpa SA. Studi mengenai mutan flagela *Salmonella typhimurium* memperlihatkan bahwa flagela dikenali melalui respon yang tidak membutuhkan SA dan TTSS-SPI1 dikenali melalui respon yang bergantung pada SA yang terlibat didalam menginduksi promoter PR 1, sebuah gen yang berkaitan dengan patogenesis dengan SA. Kp342 kehilangan flagela dan TSS-SPI1 (Dong et al. 2001); jadi, pada saat mikroorganisme ini berhubungan dengan tanaman, ia tidak menginduksi respon-respon yang bergantung pada SA dan dapat membentuk koloni didalam tanaman dengan jumlah yang lebih banyak (Iniguez et al. 2005). Kp342 mungkin telah kehilangan flagelanya selama evolusinya pada saat berhubungan dengan tanaman (Iniguez et al. 2005). Bakteri lainnya yang berinteraksi dekat dengan tanaman, seperti *Rhizobium* dan *Agrobacterium* spp., memiliki flagela, namun flagela ini bukanlah elisitor untuk mekanisme pertahanan tanaman (Felix et al. 1999). Didalam tanaman serta mamalia dan serangga, flagelin bakteri dikenali oleh reseptor yang ada dipermukaan yang mengandung protein transmembran dengan domain LRR (*leucine rich repeat*) (Gomez-Gomez dan Boiler 2002). Flagellin berperan sebagai elisitor didalam tanaman *Arabidopsis thaliana*, yang menginduksi ledakan oksidatif (oxidative burst), penumpukan kalosa dan pembentukan etilen dan yang menyebabkan terinduksinya gen-gen yang berkaitan dengan pertahanan. Tanaman dapat mendeteksi adanya molekul dari bakteri melalui sistem penginderaan senyawa kimia (Boiler 1995).

Reaksi pertahanan inang lokal diinduksi oleh strain *Burkholderia* endofit ditanaman *Vitis vinifera* (Compant et al. 2005). Oleh karenanya, masih harus diteliti apakah endofit dipengaruhi oleh kekebalan bawaan didalam tanaman, sebagaimana yang terjadi di beberapa interaksi hewan dengan bakteri (McPhee et al. 2005). Peptida antimikroba sudah berhasil diisolasi dari tanaman jagung dan padi (Duvick et al. 1992) dan dapat berperan didalam menegendalikan populasi endofit. Membatasi sumber karbon didalam cairan apoplast karbon dapat juga membatasi pertumbuhan endofit (Fuentes-Ramirez et al. 1999).

Gen-gen bakteri yang terkespresi oleh adanya tanaman. Endofit dapat mengekspresikan gen dengan cara yang berbeda-beda; dimana gen tersebut diperlukan

**Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



untuk masuk dan membentuk koloni didalam tanaman, untuk tumbuh dan bertahan didalam jaringan tanaman dan untuk merangsang pertumbuhan tanaman, berkompetisi dan menekan patogen atau membentuk substansi yang berbeda.

Bakteri endofit menjadi model yang sangat bermanfaat untuk mempelajari ekspresi gen bakteri didalam niche atau habitat alaminya (didalam tanaman), yang lebih terstruktur dan bervariasi dibandingkan dengan media kultur pada kondisi laboratorium terkontrol. Akan tetapi, sangat sedikit penelitian yang sudah dilakukan untuk hal ini. Proyek genom sedang dilakukan pada beberapa bakteri endofit, seperti *Azoarcus* spp. (Bastoni et al. 2005), *Herbaspirillum* sp., *Gluconacetobacter diazotrophicus* dan *Klebsiella* spp., yang tentunya akan banyak membantu untuk memahami lebih baik mengenai interaksi molekuler bakteri dengan tanaman. Teknologi ekspresi in vivo yang digunakan untuk mempelajari ekspresi gen di niche-niche yang berbeda, (Rediers et al. 2005) termasuk rizosfer (Ramos-Gonzalez et al. 2005), dapat juga digunakan untuk mempelajari ekspresi gen selama fase hidup endofit.

Roncato-Maccari dkk (2003) menganalisa menggunakan mikroskop *Herbaspirillum seropedicae* strain Nif⁺ yang memiliki kaset gusA didalam gen nifH nya setelah diinokulasi dengan jagung, sorghum, gandum dan padi. Mereka menemukan ekspresi gen nif didalam koloni bakteri yang terletak di luar bahan akar yang membusuk 8 hari setelah inokulasi, begitu juga di akar, batang dan daun. Menggunakan pendekatan yang sama, Vermeir dkk (1998) telah menemukan bahwa fusi nifH gusA dari *Pseudomonas stutzeri* (dulunya *Alcaligenes faecalis*) dan *Azospirillum irakense* juga terekspresi didalam akar padi. Ditemukan juga bahwa NifU (nitrogenase reduktase) dari *Klebsiella pneumoniae* terjadi pada akar tanaman jagung namun tidak di batang, dengan menggunakan antibiodi kepada enzim yang sudah dimurnikan (Chelius dan Triplett 2000b). Studi hibridisasi in situ membuktikan bahwa gen-gen nitrogen *Azoarcus* terekspresikan didalam akar dari rumput Kallar di lapang (Hurek et al. 1997). Hasil ini menunjukkan bahwa jaringan rumput berperan sebagai lingkungan yang cocok bagi ekspresi gen fiksasi nitrogen, namun kelihatannya fiksasi N₂ terbatas didalam tanaman (Christiansen-Weniger et al 1992). Rumput yang berbeda diinokulasi dengan spesies dari genus *Herbaspirillum*, *Azospirillum*, *Klebsiella* dan *Serratia* menghasilkan etilen didalam pengujian reduksi asetilen hanya pada saat sumber



karbon ditambahkan (Chelius dan Triplett 200b; Egener et al. 1999; Gyaneshwar et al. 2002).

Bakteri dapat berkomunikasi melalui "quorum sensing" sebuah istilah produksi molekul sinyal terdifusi yang mengendalikan ekspresi gen yang bergantung kepada kepadatan populasi bakteri (quorum) (Swift et al. 1996). Sampai saat ini, bakteri fitopatogenik dilaporkan dapat merespon quorum untuk membentuk antibiotik, faktor virulensi dan enzim ekso pendegradasi dinding sel (Von Bodman et al. 2003). Menariknya, tanaman dapat menerima sinyal "quorum sensing" dari bakteri dan mengendalikan respon bakteri terkait dengan quorum (Bauer dan Mathesius 2004; Mathesius et al. 2003). Akan menarik jika kita dapat mengetahui apakah endofit menghasilkan molekul "quorum sensin" didalam tanaman dan efek yang dihasilkannya. Didalam tanaman, bisa saja terdapat pertukaran molekul sinyal diantara mikroorganismenya dan bakteri dengan inang, meskipun ini belumlah dilaporkan.

Perbedaan antara bakteri endofit, bakteri pathogen dan bakteri epifit.

Sebagaimana telah didefinisikan sebelumnya, bakteri endofit adalah bakteri yang berada dalam jaringan tanaman dan bersifat non patogenik atau tidak menimbulkan penyakit pada inang. Bakteri endofit berbeda dengan bakteri pathogen dan bakteri epifit.

Bakteri Patogen adalah bakteri yang merugikan tanaman dengan menimbulkan kerusakan dan gejala yang khas pada tanaman. Bakteri pathogen umumnya dapat hidup secara parasit (patogenik) di dalam jaringan tanaman, secara epifit pada permukaan bagian-bagian tanaman seperti tunas, daun, batang, bunga, buah, batang, cabang, ranting, dan akar atau dapat pula hidup dan berkembang dengan mengambil nutrisi dari tanaman inangnya dan menyebabkan kerusakan pada tanaman inangnya. Hal ini sangat berbeda dengan bakteri endofit yang meskipun menggunakan nutrisi dari tanaman inang tetapi tidak menyebabkan kerusakan bahkan memberikan kontribusi bagi ketahanan tanaman terhadap pathogen dan tatanan lingkungan.

Bakteri epifit menurut Beattie and Lindow (1995), Bakteri epifit adalah bakteri yang dapat hidup dan berkembang biak di permukaan tanaman. Bakteri epifit berinteraksi di lingkungan luar atau di permukaan luar tanaman. Bakteri epifit sepenuhnya mandiri, kebutuhan



air diperoleh dari air hujan, embuna atau uap air sedangkan kebutuhan hara mineral diperoleh dari debu atau dekomposisi batang atau sisa-sisa bagian tanaman lain yang terurai. Akan tetapi menurut Hirano and Upper (1991) bakteri epifit mudah hilang dari permukaan dan atau terbunuh oleh radiasi UV atau sterilisasi permukaan dengan bahan kimia. Peranan bakteri epifit terhadap tanaman masih dalam pengkajian.

Berdasarkan uraian di atas, perbedaan yang paling penting dari ketiga bakteri adalah dalam hal hubungannya/interaksinya dengan tanaman, dimana bakteri endofit berada dalam jaringan tanaman tetapi tidak menimbulkan gejala atau menyebabkan penyakit [ada tanaman, bahkan keberadaannya menguntungkan tanaman. Hal ini bertolak belakang dengan bakteri pathogen yang dapat hidup sebagai parasit, pada tanaman, epifit pada permukaan bagian tanaman atau sapofit pada sisa-sisa tanaman dan menyebabkan kerusakan atau menimbulkan penyakit pada tanaman.

Bakteri endofit interaksinya dengan tanaman bersifat simbiosis mutualisme, komensalisme, sedangkan bakteri pathogen interaksinya dengan tanaman bersifat simbiosis parasitisme. Berdasarkan niche, bakteri endofit dan bakteri pathogen memiliki niche yang sama kecuali bakteri epifit yang ada di permukaan tanaman. Menurut Strobel et al. (2003) perbedaan antara mikroba endofit dan epifit adalah mikroba yang hidup sebagai endofit ada didalam jaringan tanaman sedangkan yang hidup sebagai epifit di permukaan tanaman yang ada secara alami.

Faktor-faktor abiotik dan biotik yang mempengaruhi keragaman dan populasi bakteri endofit.

Menurut Hallmann et al (2001) dan Zinniel et al (2002), keragaman populasi dari bakteri endofit dipengaruhi oleh factor lingkungan, perbedaan jenis tanaman, tipe jaringan dan waktu pengambilan sampel. Faktor abiotik (lingkungan) yang mempengaruhi keragaman dan populasi bakteri endofit dapat berupa kondisi lingkungan fisik seperti:

1. Musim ketika pengambilan sampel dilakukan. Musim ketika isolasi dilakukan sangat berpengaruh terhadap spesies bakteri endofit yang ditemukan pada musim yang berbeda. Umumnya pada musim hujan atau pada saat curah hujan tinggi mikroba endofit yang

12 **Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**



- dapat mengkolonisasi jaringan tanaman lebih rendah jika dibandingkan dengan pada kondisi dengan curah hujan sedang.
2. Jenis tanah, pada jenis tanah yang berbeda akan ditemukan spesies bakteri yang berbeda.
 3. Pemupukan. Pemupukan akan berpengaruh terhadap kolonisasi bakteri endofit pemfiksasi nitrogen seperti *Acetobacter diazotrophicus* akan terhambat jika aplikasi pemupukan nitrogen tinggi (Ramirez et al. 1999). Pembentukan koloni *Glucoracetobacter diazotrophicus* juga akan terhambat pada tanaman tebu ketika tanaman diberikan pupuk dengan kadar nitrogen tinggi. Hal ini diduga karena nitrogen akan merubah fisiologi tanaman sehingga dapat berpengaruh terhadap populasi endofit. Pada tanaman yang subur endofit menjadi lemah.
 4. Aplikasi herbisida. Penambahan herbisida glikoposfat menghasilkan modifikasi komposisi endofit dari tanaman keledai.
 5. Pemberian bahan organik. Penambahan bahan organik pada pertanaman akan meningkatkan aktivitas mikroba dan bakteri yang hidup dan berkembang pada areal tersebut. Bakteri endofit yang berasal dari rizofera tanaman akan masuk melalui perakaran sehingga dapat meningkatkan populasi bakteri endofit dalam jaringan tanaman.

Faktor-faktor yang mempengaruhi keragaman dan populasi bakteri endofit

Faktor biotik yang mempengaruhi keragaman dan populasi bakteri endofit adalah:

- a. Faktor tanaman: Tanaman inang memiliki kemampuan yang berbeda dalam mempengaruhi terbentuknya koloni bakteri endofit. Faktor-faktor tanaman yang berperan dalam mempengaruhi keragaman dan populasi bakteri endofit adalah:
 1. Genotip tanaman. Ekologi mikroba endofit sangat dipengaruhi oleh genotip tanaman, dan ekologi ini sangat berpengaruh terhadap keragaman dan populasi bakteri endofit.
 2. Perbedaan spesies, varietas/kultivar tanaman akan menghasilkan kolonisasi endofit yang berbeda. Melnory and Klopper (1995) melaporkan pengaruh spesies tanaman

13 **Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.**

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengurniakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



terhadap perbedaan spectrum bakteri endofit pada jagung manis dan kapas. Pada akar kapas ditemukan beberapa genus bakteri endofit seperti *Alcaligenes*, *Aureobacterium*, *Cellulomanas*, *Comamonas*, *Eurisia*, *Ochrobacterium* dan *Yersinia* sedangkan pada akar jagung manis ditemukan genera lain seperti *Arthrobacter*, *Citrobacter*, *Flavimonas*, *Microbacterium* dan *Stenotrophomonas*. Hal ini membuktikan bahwa pada jenis/spesies tanaman yang berbeda dikoloni oleh bakteri endofit yang berbeda.

© Hak cipta milik IPB (Institut Pertanian Bogor)

Bogor Agricultural University

14

3. Umur tanaman berpengaruh terhadap keragaman bakteri endofit. Fase pertumbuhan tanaman yang berbeda akan berpengaruh terhadap keragaman dan populasi bakteri endofit.
 4. Jaringan tanaman yang diambil. Isolasi bakteri endofit dari jaringan tanaman yang berbeda akan menghasilkan keragaman dan populasi bakteri endofit yang berbeda pula. Pada akar umumnya kepadatan populasi endofit lebih tinggi dibandingkan pada batang dan daun. Pada akar, kepadatan populasi bakteri endofit adalah 10^5 cfu/g akar (Hallmann et al. 1997), pada batang 10^4 cfu/g berat batang dan pada daun jumlahnya sekitar 10^3 cfu.
 5. Perubahan fisiologi tanaman. Perubahan fisiologi tanaman dapat menyebabkan pembentukan populasi endofit yang khas.
 6. Pembentukan senyawa metabolit sekunder. Pembentukan senyawa metabolit sekunder pada tanaman seperti *Flavonoid* dapat merangsang pembentukan koloni *Azorhizobium caulinodans* dan *Azospirillum brasilense*.
 7. Tahap pertumbuhan dan perkembangan tanaman mempengaruhi pertumbuhan populasi endofit. Peningkatan pertumbuhan tanaman tomat dapat mempercepat pertumbuhan populasi bakteri endofit.
 8. Adanya migrasi benih mungkin dapat mempengaruhi komunitas endofit di dalam benih.
- b. Faktor bakteri: Keragaman dan populasi bakteri endofit sangat tergantung dari spesies/strain bakteri dan kepadatan inokulum.

Disampaikan dalam Seminar Nasional dan Gelar Produk Bidang Ilmu Hayati”
Pengelolaan dan Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati dalam Kerangka
Pembangunan Berkelanjutan” di Bogor, Tanggal 4 September 2003.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



- c. Faktor organisme lain: adanya organism lain seperti cendawan akan mempengaruhi pembentukan koloni bakteri endofit, demikian pula sebaliknya.

Potensi bakteri endofit terhadap stimulasi pertumbuhan dan produksi tanaman

1. Kemampuan beberapa bakteri endofit untuk memfiksasi nitrogen dari udara sehingga tersedia dan dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Banyak bakteri endofit yang tidak membentuk nodul tetapi dapat memfiksasi nitrogen. Reither et al. (2003) melakukan identifikasi terhadap bakteri endofit hasil isolasi dari batang ubi jalar dan hasilnya menunjukkan terdapat bakteri endofit yang memiliki kemampuan memfiksasi nitrogen, yaitu *Sinorhizobium meliloti*, *Rhizobium sp*, *Rhizobium etli* dan *Klebsilla pneumonia*. Hasil penelitian Sturz et al (2000) menunjukkan bahwa *Klebsiella pneumonia* mampu memfiksasi nitrogen dan memacu pertumbuhan gandum. Viera et al (2002) juga melaporkan bahwa bakteri endofit *Rahnella aquatic* yang diisolasi dari batang ubi jalar memiliki kemampuan memfiksasi nitrogen dan memacu pertumbuhan tanaman.
2. Beberapa bakteri endofit juga diketahui memiliki kemampuan membentuk/memproduksi fitohormon seperti Auksin (Indot asetil IAA), Sitokinin dan giberalin. IAA merupakan fitohormon yang berperan dalam perpanjangan sel dan organ, pembentukan akar, pergerakan tropisme, dormansi apical, mempercepat proses pembungaan, partenokarpi, absisi, pembentukan kalus, pembelahan sel dan diferensiasi jaringan vaskuler (Susilowati. 2006). Taghavi et al. (2009) menyatakan bahwa bakteri endofit mampu meningkatkan sintesis hormone pertumbuhan seperti IAA yang sebagian besar dihasilkan oleh *Pseudomonas putida* (W619). IAA yang dihasilkan oleh bakteri yang diisolasi dari Brassicae dapat meningkatkan tingi tanaman 56,5%, diameter batang 11% dan jumlah cabang 35,7% di banding control (Asghar et al. 2002).
3. Bakteri endofit mampu menghasilkan siderofor yaitu senyawa organic yang mengkelat besi (Fe). Siderofor merupakan senyawa yang memiliki bobot molekul relative rendah, sebagai agens spesifik pengkelat ion Fe yang diuraikan oleh bakteri, Cendawan dan tumbuhan



kelompok rumput-rumputan yang tumbuh pada keadaan cekaman lingkungan akibat Fe rendah. Siderofor dalam mengikat Fe^{3+} dan dapat memfasilitasi transportasi besi seluler (Elmi et al. 2000).

Kemampuan bakteri endofit penghasil Siderofor dalam mengikat Fe^{3+} merupakan pesaing terhadap mikroorganisme lain. Mekanisme kerja Siderofor terjadi melalui perkembangan yang cepat dari bakteri yang mengolonisasi akar tanaman dan memindahkan besi di daerah permukaan serta terciptanya kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan akar dan tidak sesuai untuk pertumbuhan pathogen (Budzikiewisz, 2001). Bakteri penghasil Siderofor juga dapat mengindikasikan ketahanan tanaman, mekanisme ketahanan tanaman terjadi karena adanya perbaikan lingkungan tumbuh dari adanya interaksi mikroba tanaman. Beberapa bakteri penghasil Siderofor yang telah digunakan dalam bidang pertanian diantaranya *Pseudomonas abuginosa*, *Pseudomonas fluorescens* (Rachid and Ahmed 2005), *Pseudomonas putida* (Budzikiewisz, 2001), dan *Bacillus sp* (Wahyuni et al. 2001).

4. Bakteri endofit mempunyai kemampuan dalam melarutkan fosfat dan memobilisasi fosfat untuk tanaman sehingga menjadi fosfat yang tersedia bagi tanaman yaitu PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , dan $H_2PO_4^{-}$. Fosfat dibutuhkan oleh tanaman dalam merangsang pertumbuhan akar, mempercepat dan memperkuat pertumbuhan tanaman muda, asimilasi dan respirasi serta mempercepat pembungaan. Kemampuan bakteri pelarut fosfat dalam melarutkan unsure P menjadi bentuk P yang tersedia bagi tanaman memiliki peranan penting dalam meningkatkan hasil (Hallmann 2001).

5. Bakteri endofit sebagai agens biokontrol pathogen tanaman. Kemampuan bakteri endofit dalam menghasilkan antibiotik dan enzim-enzim pendegradasi dinding sel, kemampuan dalam kompetisi ruang dan nutrisi, kemampuan parasitisme, kemampuan menginduksi ketahanan tanaman, kemampuan menginduksi respon pertahanan fisik dan mekanik, dan kemampuan sebagai pemacu pertumbuhan tanaman menyebabkan bakteri endofit dapat berperan sebagai agens biokontrol pathogen sehingga dapat meningkatkan produksi tanaman.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.

2. Dilarang mengurnikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

6. Kompetisi nutrisi dan niche dengan pathogen. Potensi bakteri endofit dalam stimulasi pertumbuhan dan produksi tanaman adalah melalui kompetisi nutrisi dan niche dengan pathogen sehingga pathogen tidak dapat menginfeksi tanaman dan tanaman dapat tumbuh maksimal.
7. Bakteri endofit meningkatkan ketersediaan mineral karena bakteri endofit memperluas permukaan dalam penyerapan mineral.
8. Menginduksi ketahanan tanaman baik ketahanan sistemik ISR (induced systemic resistance) maupun ketahanan perolehan SAR (systemic acquired resistance). Bakteri mempengaruhi gen ketahanan dengan mengaktifkan lintasan transduksi signal yang melibatkan asam jasmonik dan etilen serta menghasilkan senyawa tertentu seperti Lipopolysacharida.
9. Bakteri endofit meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stress lingkungan.
10. Informasi terbaru menunjukkan bahwa endofit mampu menghasilkan substansi volatile seperti 2-3 butadienol dan acetoin yang terlibat dalam pertumbuhan tanaman yang cepat.

Persamaan dan keunggulan dari bakteri endofit dan bakteri rizofer sebagai biokontrol agen.

Persamaan bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol bahwa bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol memiliki kemampuan antagonis dari rendah sampai tinggi. Mekanisme dalam mengendalikan pathogen baik bakteri rizofer maupun bakteri endofit sangat beragam. Bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol dapat disolasi dan ditumbuhkan pada media buatan sehingga dapat diperbanyak. Karena dapat ditumbuhkan pada media buatan, bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol secara ekonomis harganya lebih murah dan formulasinya relative lebih mudah.



Bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol teknik perbanyakannya sederhana. Dalam aplikasi dilapangan bakteri endofit dan rizofer kompetibel dengan teknik pengendalian hayati lainnya dan sinergi dengan bahan organic. Penggunaan bakteri endofit dan rizofer sebagai agens biokontrol bersifat aman bagi lingkungan. Namun demikian, masing-masing bakteri memiliki keunggulan yang menyebabkan bakteri tersebut lebih banyak digunakan sebagai agens biokontrol. Dalam hal ini bakteri endofit memiliki beberapa keunggulan untuk digunakan sebagai agens biokontrol diantaranya:

Keberadaan bakteri endofit yang menempati jaringan tanaman menyebabkan bakteri ini lebih terlindungi dari pengaruh factor lingkungan yang tidak menguntungkan. Factor lingkungan yang ekstrim merupakan factor penghambat perkembangan agens antagonis.

Bakteri endofit secara alami dan kuat berasosiasi dengan niche jaringan tanaman yang sama dengan pathogen penyebab penyakit sehingga lebih mampu melawan pathogen. Hal ini juga menunjukkan bahwa bakteri endofit sesuai digunakan sebagai agens bikontrol karena bakteri endofit menkolonisasi niche seperti pathogen tumbuhan.

Keberadaan bakteri endofit didalam tanaman menyebabkan tercukupinya nutrisi sehingga potensinya sebagai agnes biokontrol dapat optimal. Keberadaan bakteri endofit dalam jaringan tanaman menyebabkan antibiotic dan senyawa metabolit sekunder lainnya yang diproduksi oleh bakteri endofit lebih mudah terdistribusi ke jaringan tanaman, sehingga mekanisme antagonism dapat berjalan dengan baik. Hal ini juga terjadi pada bakteri rizofer dimana produksi metabolit sekunder yang dihasilkan dapat membentuk “barrier” atau penghalang dipermukaan akar sehingga dapat melindungi akar dari infeksi parasit seperti bakteri, cendawan, actinomycetes dan nematoda parasit.

Menurut Siddiui and Mahmoud (1999), sebagian besar bakteri rizofer rizofer yang bertindak sebagai agens pengendali nematode parasit tanaman adalah dengan cara memproduksi metabolit sekunder, enzim dan tioksin. Pengaruh toksin yang dihasilkan bakteri rizofer terhadap nematode meliputi penekanan reproduksi nematode meliputi, penetasan telur dan kelangsungan hidup javenil serta membunuh nematode secara langsung. Mikroba endofit dan rizofer sangat sinergistik dengan tanaman inangnya, dimana sebagian besar dari endofit mampu membuat kembali nutrisi dari tanaman dengan cara menghasilkan senyawa khusus, seperti metabolit sekunder untuk melindungi inangnya dari cendawan dan hama serta produksi

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengurnikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



HCN untuk membunuh nematoda. Karena tanaman memberikan kecukupan nutrisi bagi bakteri rizofor (melalui eksudat akar) dan bakteri endofit. Sehingga bakteri tersebut dapat berkembang dibawah kondisi bersaing dan melindungi tanaman dari pathogen.

Contoh bakteri endofit sebagai agens biokontrol

Hallmann et al (1995) melaporkan 7 isolat bakteri endofit yang diisolasi dari mentimun dan kapas dapat mengurangi populasi *Meloidogyne incognita* sampai 50%. Aplikasi bakteri endofit melalui perlakuan benih dapat mengurangi 30%-50% jumlah gall *Meloidogyne incognita* pada tanaman kapas (Hallmann et al. 1997). Produksi 2,4-diacetylphloroglucinol, oleh bakteri *Pseudomonas fluorescens* secara signifikan menandakan penetasan telur dan menyebabkan kematian juvenile *M. Javanica* (Trub) Chitwaodi. Penggunaan *Bacillus pumices* dan *Bacillus mycoides* efektif mengurangi jumlah puru akar dan telur *Meloidogyne incognita* 33 dan 39% pada tanaman kopi.

Bakteri endofit yang diisolasi dari tomat seperti *Pantoea agglomerans*, *Cedecea davinsae*, *Enterobacter* dan *Pseudomonas putida* dapat mengurangi populasi dan jumlah puru *Meloidogyne incognita* 18-45% (Munif, 2001).

Bakteri endofit yang diisolasi dari akar tanaman padi varietas GJ-17 dan diidentifikasi sebagai *Pseudomonas pseudocaligens* menginduksi pertahanan tanaman terhadap cendawan pathogen *Magnaphorte grisea* penyebab penyakit blas pada padi. *Agrobacterium radiobacter* (G12) dan *Bacillus sphaerius* (B43) menurunkan/mengurangi penetrasi nematode sista kentang *Globodera pallida* pada pengujian rumah kaca dan dilapang sebesar 30-40% (Racke and Sikara 1992).

Kemampuan bakteri endofit dalam menghambat pathogen berkaitan dengan beberapa karakter fisiologis yang dimilikinya, seperti produksi enzim kitinase, enzim protease, menghasilkan senyawa toksik dan kemampuannya dalam menginduksi ketahanan tanaman terhadap pathogen. Enzim kitinase yg dihasilkan bakteri endofit dapat mendegradasi dinding sel pathogen yang disusun oleh senyawa kitin, seperti dinding sel cendawan, nematode dan serangga.

Oku (1994) melaporkan bahwa aktivitas kitinase bakteri endofit berkorelasi positif dengan tingkat induksi ketahanan sistemik. Peranan enzim ini dalam ketahanan terhadap



serangan pathogen dapat melalui penghambatan pertumbuhan pathogen dan pelepasan elicitor endogen yang kemudian memacu reaksi ketahanan sistemik pada tanaman inang sehingga terjadi penurunan atau penghambatan invasi pathogen.

Mekanisme (*mode of action*) bakteri endofit dalam pengendalian hama dan penyakit tanaman

Menurut Hallmann et al. (1997), bakteri endofit dapat berperan sebagai agens pengendali hayati jika bakteri endofit telah berasosiasi dengan tanaman sebelum pathogen menyerang tanaman tersebut. Cara kerja bakteri endofit sebagai agens pengendali hayati antara lain kompetisi ruang dan nutrisi mikro seperti zat besi dan produksi siderofor serta menginduksi ketahanan tanaman sehingga tanaman menjadi lebih resisten. Secara garis besar mekanisme bakteri endofit mengedalikan hama dan penyakit tanaman dapat dikelompokkan menjadi 2 mekanisme secara langsung dan tidak langsung.

Secara Langsung (*direct antagonism*)

Mekanisme secara langsung (*direct antagonism*), terdiri dari beberapa mekanisme yaitu kompetisi sumber daya baik ruang maupun nutrisi. Kemampuan kompetisi ruang disebabkan karena endofit mengkolonisasi niche yang sama dengan pathogen dan pertumbuhan bakteri endofit relative cepat sehingga dapat mengalahkan pertumbuhan pathogen. Demikian pula kebutuhan nutrisi. Sebagai contoh Siderophore (chelator), dihasilkan oleh bakteri endofit dalam jumlah yang banyak, untuk bersaing memanfaatkan unsure-unsur mineral spesifik sehingga dapat menghambat pathogen untuk memenuhi kebutuhannya pada mineral-mineral yang terbatas.

Antibiosis: antibiosis merupakan mekanisme penting dari bakteri endofit yang digunakan untuk menekan pathogen tanaman termasuk nematoda parasit tanaman. Bakteri endofit mampu menghasilkan metabolit yang memiliki aktivitas antibakteri, antifungi dan antinematoda (nematocida). Senyawa antibiotic yang dihasilkan oleh bakteri antagonis dapat berperan langsung sebagai bakterisida terhadap bakteri pathogen dan agens penginduksi (elicitor) ketahanan tanaman terhadap penyakit (Liu et al. 1995).



Li et al. (2002) melaporkan bahwa produksi metabolit toksik dalam kultur filtrate dari isolate bakteri endofit *Buikholderia ambifaria* dari akar jagung dapat menghambat penetasan telur dan mobilitas dari juvenile 2 *Meloidogyne incognita*.

Menghasilkan enzim ekstraseluler. Bakteri endofit dapat menghasilkan enzim-enzim ekstraseluler diantaranya adalah kيتينase, selulase, protease, dan pektinase. Enzim kيتينase merupakan enzim yang dihasilkan oleh bakteri antagonis untuk mengendalikan pathogen terutama pathogen tular tanah, karena enzim ini dapat mendegradasi dinding sel pathogen yang disusun oleh senyawa kitin, seperti dinding sel cendawan, nematode dan serangga.

Cronin et al (1997) melaporkan bahwa enzim kيتينase yang dihasilkan oleh *Pseudomonas chitinolytica* dapat menghambat penetasan telur nematoda *Globodera rostochiensis* sampai 70% dan dapat mengurangi infeksi *Meloidogyne javanica* sekaligus meningkatkan pertumbuhan tanaman tomat.

Enzim protease yang dihasilkan oleh bakteri endofit berperan dalam mendegradasi dinding sel pathogen. Disamping berfungsi untuk mendegradasi dinding sel pathogen, protease dapat digunakan oleh bakteri untuk melakukan penetrasi secara aktif kedalam jaringan tanaman. Benhamou et al. (1996) melaporkan bahwa enzim selulase dan pektinase yang dihasilkan oleh *Pseudomonas fluorescens* dapat digunakan oleh bakteri tersebut untuk mengkolonisasi daerah interseluler jaringan korteks akar, sehingga terjadi penghambatan invasi pathogen. Selain itu protease yang dihasilkan oleh *P. fluorescens* dapat menghambat penetasan telur *M. javanica* (Siddiqui and Shaukat 2003).

Menghasilkan metabolit sekunder yang dapat melindungi tanaman inangnya dari infeksi fungi dan hama (Hallmann et al. 1997). Metabolit sekunder yang dihasilkan bakteri endofit dapat berupa antibiotic, enzim, senyawa HCN dan Siderofor. Hydrogen sianida (HCN) merupakan senyawa metabolit sekunder yang umumnya dihasilkan oleh bakteri *Pseudomonas* kelompok *fluorescens* dan juga oleh kelompok *Pseudomonas* lain. HCN yang dihasilkan oleh bakteri *Corynebacterium paurometabolu* dapat membunuh juvenile dan menghambat penetasan telur nematode (Mena and Pimental 2002), dan HCN yang dihasilkan oleh *Pseudomonas* kelompok *fluorescens* dapat mengendalikan beberapa pathogen, diantaranya *Pythium ultimum* pada bit gula (Wiyono 2003), dan penyakit akar gada pada caisin (Widodo, 1993).



Bakteri endofit sebagai agens biokontrol dapat mengendalikan pathogen melalui mekanisme parasitisme.

Mekanisme lain bakteri endofit mangendalikan infeksi pathogen danhama adalah dengan memacu prtumbuhan tanaman. Bakteri endofit dilaporkan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman baik secara langasung maupun tidak langsung (Suretta et al. 2003). Secara langsung bakteri dapat menyediakan nutrisi bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfat dan mineral lainnya serta menghasilkan hormone pertumbuhan seperti etilen, auxin dan sitokinin (Sturz et al. 2000). Disamping dapat nutrisi, bakteri endofit meningkatkan hormone pertumbuhan seperti auxin (indo lactic acid atau IAA) dan sitokinin. IAA yang dihasilkan bakteri yang diisolasi dari Brassicacae dapat meningkatkan tinggi tanaman 56,5%, diameter batang 11% dan jumlah cabang 5,7% dibanding kontrol (Benhamou et al 1996).

Salah satu kemungkinan mekanisme bakteri endofit dalam mengendalikan infeksi pathogen pada tanaman adalah melalui pengaruhnya terhadap fisiologi tanaman. Mekanisme ini menyebabkan terjadinya penyimpangan mekanisme fisiologi tanaman yang mengarah pada peningkatan produksi metabolit sekunder tertentu pada tanaman.

Secara tidak langsung (*indirect antagonism*)

Mekanisme bakteri endofit dalam mengendalikan penyakit secara tidak langsung adalah melalui induksi ketahanan tanaman. Induksi kethanan tanaman adalah fenomena terjadinya penignkatan ketahanan tanaman terhadap infeksi pathogen akibat adanya rangsangan. Ketahanan ini merupakan perlindungan terhadap tanaman yang didasari pada mekanisme ketahanan yang dirangsanh olh perubahan metabolic. Induksi ketahanan tanaman oleh bakteri endfit dapat perubahan metabolic. Induksi ketahanan tanaman oleh bakteri endofit dapat berupa induksi ketahanan sistemik (ISR) atau ketahanan perolehan (SAR).

Induksi ketahanan sistemik (ISR) adalah ketahanan tanaman terinduksi oleh agen biotic non-patogenik seperti rizobakteria, endofit dan plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) (Liu et al. 1995). Mikroorganisme ini mengaktifkan lintasan transduksi signal yang melibatkan asam jasmonik dan etilen tanaman untuk mengaktifkan gen-gen ketahanan. Mekanisme bakteri endofit yang menginduksi ISR adalah dengan menghasilkan senyawa tertentu seperti Lipopolysacarida (LPS). Hasil percobaan Reitz et al (2000) menggunakan teknik split-root,



menunjukkan bahwa perlakuan system perakaran dengan LPS dari *Rhizobacteria Rhizobium etli* dapat menurunkan penetraswi akar oleh nematode sista *Globodera pallid*. Hasil penelitian menunjukkan LPS dari *Rhizobium etli* bertindak sebagai senyawa penginduksi ketahanan sistemik terhadap *Globadera pallid* pada akar kentang.

Menurut Sturz et al. (2000), akibat ISR akan mempengaruhi proses fisiologis didalam akar seperti mencegah proses makan nematode, mencegah terbentuknya feeding site, menghambat penetrasi dan reproduksi nematoda. Beberapa spesies PGPR dan endofit diketahui dapat memicu systemic acquire resistance (SAR). SAR atau disebut juga dengan ketahanan perolehan, ketahanan ini terinduksi karena penambahan senyawa kimia atau menginokulasikan pathogen nekrotik. Induksi SAR dicirikan dengan terbentuknya akumulasi asam salisilat dan PR-protein (pathogenesis-related protein).

Mekanisme secara tidak langsung akibat adanya/infeksi bakteri endofit dalam jaringan tanaman adalah terjadinya peningkatan akumulasi senyawa fend. Senyawa ini merupakan senyawa aktif yang memegang peranan penting terhadap penekanan mikroba yang menginfeksi tanaman karena senyawa ini menyebabkan suatu lingkungan menjadi toksik untuk perkembangan mikroba. Beberapa peneliti menjelaskan peranan bakteri endofit menginduksi akumulasi senyawa fenol.

Sturz et al. (2000) menunjukkan bahwa bakteri endofit *Burkholderia phytofirmans* menginduksi akumulasi senyawa fenol dan penguatan dinding eksodermis pada tanaman anggur.

Prospek pengembangan bakteri endofit di Indonesia

Mikroba endofit khususnya bakteri endofit memiliki peranan yang cukup penting dalam bidang kesehatan karena kemampuannya dalam menghasilkan metabolit sekunder yang dapat digunakan sebagai bahan baku obat. Kemampuan mikroba endofit memproduksi senyawa metabolit sekunder sesuai dengan tanaman inangnya merupakan peluang yang sangat besar dan dapat diandalkan untuk memproduksi metabolit sekunder dari mikroba endofit yang diisolasi dari tanaman inangnya tersebut. Bakteri endofit yang diisolasi dari tanaman obat dapat menghasilkan alkaloid atau metabolit sekunder sama dengan tanaman aslinya atau bahkan dalam jumlah yang lebih tinggi. Hal ini sangat menguntungkan bagi perkembangan bidang



kesehatan karena Indonesia merupakan Negara yang kaya akan keragaman tanaman yang berkhasiat obat. Lasman telah membuktikan bahwa keberadaan mikroba endofit dengan senyawa aktifnya dapat bermanfaat sebagai bahan obat. Diantaranya berasal dari Pohon Kina (*Cinchona spp*) yang dikoleksi dari Gunung Mas Puncak Jawa Barat yang dikolonisasi oleh 36 jenis Cendawan, 18 Khamir dan 17 bakteri. Fermentasi salah satu mikroba endofit Kb menghasilkan senyawa alkaloid kuinin yang aktif sebagai anti malaria.

Mikroba endofit yang diisolasi dari tanaman Kunyit (*Curcuma domestica*) menghasilkan senyawa yang memiliki aktivitas antioksidan, antidiabetes dan bahan antikanker. Indonesia yang kaya akan keanekaragaman hayati merupakan sumber potensial mikroba endofit yang bermanfaat dan potensial untuk dikembangkan dimasa mendatang.

Hasil penelitian terbaru menunjukkan bahwa mikroba endofit selain dapat menghasilkan metabolit sekunder ternyata juga mampu mentransformasi senyawa metabolit sekunder menjadi senyawa baru yang memiliki kerangka dasar yang mirip atau derivat dari metabolit yang ditransformasi. Proses ini disebut proses biotransformasi dimana suatu metabolit sekunder menjadi produk baru. Hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa pengembangan mikroba endofit sebagai salah satu penghasil bahan yang bermanfaat bagi kesehatan sangat potensial.

Prospek pengembangan bakteri endofit dalam bidang industri dan pertanian tidak kalah pentingnya dengan dibidang kesehatan. Dalam bidang industry farmasi telah banyak digunakan mikroba endofit sebagai bahan baku obat-obatan. Dalam bidang pertanian endofit telah berkembang pesat baik eksplorasi, identifikasi maupun pemanfaatannya. Pemanfaatan bakteri endofit dalam bidang pertanian terutama untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi hasil pertanian serta peningkatan kesehatan lingkungan. Ke depan, mikroba endofit sangat potensial untuk dikembangkan dan dimanfaatkan.

DAFTAR PUSTAKA

Benhamou N, Kloepper JW, Quadt-Hallmann A, Tuzun S. 1996. Induction of defense-related ultrastructural modifications in pea root tissues inoculated with endophytic bacteria. Plant Physiol. 112: 919-929.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.

2. Dilarang mengurniakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

- Burges HD, KA Jones. 1998. Introduction In Burges, HD (Ed). *Formulation of Microbial Biopesticides: Beneficial Microorganisms, Nematodes, and Seed Treatments*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands. 127 pp.
- Cook JR, Baker KF. 1983. The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens. APS Press. St. Paul. Minnesota. pp. 539.
- Engelhard, M., Hurek, T., and Reinhold-Hurck, B. 2000. Preferential occurrence of diazotrophic endophytes, *Azoarcus* spp., in wild rice species and land races of *Oryza sativa* in comparison with modern races. *Environ. Microbiol.* 2:131-144.
- Elmi AA, West CP, Robbins RT, Kirkpatrick TL. 2000. Endophyte effects on reproduction of root knot nematode *Meloidogyne marylandi* and osmotic adjustment in tall fescue. *Grass and Forage Science* 55:166-172.
- Fuentes-Ramirez, L. F., Caballero-Mellado, J., Sepulveda, J., and Martinez-Romero, E. 1999. Colonization of sugarcane by *Aceibacter diuiothiphicus* is inhibited by high N-fertilization. *FEMS (Fed. Eur. Microbiol. Soc.) Microbiol. Ecol.* 29:117-128.
- Gasoni P, Cozzi J, Kobayashi K. 1998. Survival of potential biocontrol bacteria in various formulations and their ability to reduce radish damping-off caused by *Rhizoctonia solani*. *J Plant Disease and Protec.* 105 (4):41-48.
- Germida J J, Siciliano, S. IX, De I-reias, J. K., Seib, A. M. 1998. Diversity of root-associated bacteria associated with field-grown caiola (fl/-(j.v.vir-« *rmpu*. | L.j and wheat (*Triticum acstivtini*), *FHMS -Microbiol. Ecol*, 26:43-50.
- Gomez-Gomez, L., and Bolter, T. 2002. Flagellin perception: A paradigm for innate immunity. *Trends Plain Sci.* 7:251 -256,
- Hackenberg G, Muelchenn A, Forge A, Vrain T. 2000. *Pseudomonas chlororaphis* strain Sm3, bacterial antagonist of *Meloidogyne incognita* on cucumber. *Phytopathology* 85:1136
- Hallmann J, Quadt-Hallmann A, Mahaffee WF, Kloepper JW. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can J Microbiol.* 43:895-914.
- Hallmann J, Kloepper JW, Rodriguez-kabana R, Sikora RA. 1995. "Endophytic rhizobacteria as antagonists of *Meloidogyne incognita* on cucumber" [abstrak]. *Phytopathology* 85:1136.
- Hallmann J, Rodriguez-kabana R, Kloepper JW. 1997. "Nematode interactions with endophytic bacteria". In: Ogoshi A, Kobayashi K, Homma K, Kodama F, Kondo N,



Akino S, Eds. *Plant growth-promoting rhizobacteria, present status and future prospects*. Proc. 4th Intern. Workshop on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. Japan-OECD Joint Workshop. Sapporo, Japan. 243-245 pp.

Helgason, T., Watson, I. J., and Young, J. P. W. 2003. Phylogeny of the Glomerales and Diversisporales (Fungi: Glomeromycoia) from aeiin and elongation factor I-alpha sequences. FEMS (Fed. Eur. Microbiol. Soc.) Microbiol. Leu. 229:127-132.

Hinton, D. M., and Bacon, C. W. 1995. *Entemobacter cloacae* is an endophytic symbion of corn. Mycopathologia. 129:117-125.

Hoitink, HAJ. 1986. Basis for control of soilborne plant pathogens with composts. *Ann. Rev. Phytopathol.* 24:93-114

Liu L, Kloepper JW, Tuzun S. 1995. Induction of systemic resistance in cucumber against angular leaf spot by plant growth-promoting rhizobacteria. *Phytopathology* 85: 843-847

McInroy A, Kloepper JW. 1995. Survey of indigenous bacterial endophytes from cotton and sweet corn. *Plant Soil* 173:337-342.

Munif A, Hallmann J, Sikora, RA. 2000. Evaluation of the biocontrol activity of endophytic bacteria from tomato against *Meloidogyne incognita*. *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent*, 65(2b): 471-480.

Parke JL, Gurian-Sherman D. 2001. Diversity of the *Burkholderia cepacia* complex and implications for risk assessment of biological control strains. *Annu. Rev. Phytopathol.* 39:225-258.

Pleban S, Ingel F, Chet I. 1995. Control of *Rhizoctonia solani* and *Sclerotium rolfsii* in the greenhouse using endophytic *Bacillus* spp. *Eur J Plant Pathol.* 101:665-672.

Reiter B, Pfeiftr U, Schwab H, Sessitsch A. 2002. Response of endophytic bacterial communities in potato plains to infection with *Erwinia carotavora* subsp. airosepiica. *Appl. Environ. Microbioi.* 68:2261-2268.

Reiter B, Birgnian H, Burg K, Sessitsch A. 2003. Endophytic gene diversity in African sweet potato. *Can. J. Microbiol.* 49:549-555.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengurniakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

- Riggs, P. J., Chelius, M. K., Imguez, A. L., Kaeppler, S. M., and Triplett, H. W. 2001. Enhanced maize productivity by inoculation with diazotrophic bacteria. *Ausl. J. Plant Physiol.* 28:829-836.
- Roncalo-Maccari, L. D. B., Ramos, H. J. O., Pedrosa, F. O., Alquini, V., Chubaisu, L. S., Yutes, M. G., Rigo, L. U., Steffens, M. B. R., and Souza, P. M. 2003. Endophytic *Herbaspirillum seropedicae* expresses *nif* genes in gramineous plants. *FEMS (Fed. Eur. Microbiol. Soc.) Microbiol. Ecol.* 45:39-47.
- Rosenblueth, M., Martinez, L., Silva, J., and Martinez-Romero, E. 2004. *Klebsiella variicola*, a novel species with clinical and plant-associated isolates. *Syst. Appl. Microbiol.* 27:27-35.
- Rosenblueth, M., and Martinez Romero, E. 2004. *Rhizobium etli* maize populations and their competitiveness for root colonization. *Arch. Microbiol.* 181:337-344.
- Ryu, C. M., Farag, M. A., Hu, C. -H., Reddy, M. S., Wei, H. -X., Pare, P. W., and Kloepper, J. W. 2003. Bacterial volatiles promote growth in *Aralndupsis*. *Proc. Nail. Acad. Sci. U.S.A.* 100:4927-4932.
- Stone, E. K., Bacon, C. W., and White, J. F. 2000. An overview of endophytic microbes: endophytism defined. Pages 3-30 in: *Microbial Endo-phytes*, C. W. Bacon, and J. F. White (eds.). Marcel Dekker, New York.
- Strobel, G., and Daisy, B. 2003. Bioprospecting for microbial endophytes and their natural products. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 67:491-502.
- Strobel, G-, Daisy, B., Castillo, U., and Harper, J. 2004. Natural products from endophytic microorganisms. *J. Nat. Prod.* 67:257-268.
- Sturz AV, Nowak J. 2000. Endophytic communities of rhizobacteria and the strategies required to create yield enhancing associations with crops. *Appl. Soil Ecol.* 15:183-190.
- Sturz AV, Christie, BR, Malheson BG, Nowak J. 1997. Biodiversity of endophytic bacteria which colonize red clover nodules, roots, stems and foliage and their influence on host growth. *Biol. Fertil. Soils* 25:13-19.
- Sturz AV, Christie BR. 1995. Endophytic bacterial systems governing red clover growth and development. *Ann. Appl. Biol.* 126:285-290.



- Sturz AV, and Christie BR. 1996. Endophytic bacteria of red clover as agents of allelopathic clover-maize syndromes. *Soil Biol. Biochem.* 28:583-588.
- Sturz AV, Christie BR, Nowak J. 2000. Bacterial endophytes: Potential role in developing sustainable systems of crop production. *Crit. Rev. Plant Sci.* 19:1-30.
- Suwanto A, H Friska, Idwan S. 1996. Karakterisasi *Pseudomonas fluorescens* B29 dan B39: profil DNA genom, uji hipersensitivitas, dan asai senyawa aktif. *Hayati* 3(1): 15-20.
- van der Lelie, D., Barac, T., Taghavi, S,, and Vangrosveld, J. 2004. Response to Newman: New uses of endophytic bacteria to improve phy-toremediation. *Trends Biotechnol.* 23:8-9,
- van Peer, R., Punte. H. L. M., de Weger, L. A., and Schippers, B. 1990. Characterization of root surface and endorhizosphere pseudomonads in relation to their colonization of roots. *Appl. Environ. Microbiol.* 56:2462-2470.
- Viera A, Vicente LP. 2002. A study of endophytic fungal species associated with root necrosis of banana in banana and plantain plantations in Cuba. *Infomusa Vol. 11 No. 1*, pp. 23-24.
- Weber, O. B., Baldani, V. L. D., Teixeira, K. R. S., Kirchof, G., Baldani, i. I., and Dobereiner, 1999. Isolation and characterization of diazotro-phic bacteria from banana and pineapple plants. *Plant Soil* 210:103-113.
- Webster, G., Jain, V., Davey, M. R., Gough, C, Vasse, J., Denarie, J., and Cocking, E. C. 1998. The flavonoid naringenin stimulates the intercellular colonization of wheat roots by *Morhizobium caulinodans*. *Plan! Cell Environ.* 21:373-383.
- Weller, D.M. 1988. Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 26: 379-407.
- Zinniel DK, Lambrecht P, Harris NB, Feng Z, Kuczmarski D, Higley P, Ishimaru C, Arunakumari A, Barletta RG, Vidaver AK. 2002. Isolation and characterization of endophytic colonizing bacteria from agronomic crops and prairie plants. *Appl. Environ. Microbiol.* 68:2198-2208.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.

2. Dilarang mengurnikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.