

# Studi Literatur Potensi Bakteri Endogenik Lahan Gambut Sebagai *Biofertilizer* untuk Memperbaiki Nutrisi Lahan

Hilda El Yasa Alam dan Enny Zulaika  
Departemen Biologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: enny@bio.its.ac.id

**Abstrak**—Lahan gambut merupakan lahan dengan kesuburan rendah sehingga kurang layak digunakan sebagai lahan pertanian. Rekayasa lahan gambut untuk meningkatkan kesuburan dapat dilakukan dengan bioaugmentasi bakteri endogenik yang bersifat lignoselulolitik, memiliki potensi sebagai *biofertilizer* dan menghasilkan hormon auksin. Uji sinergisme dilakukan pada *Bacillus* D1, D2, D3, U2, U4 dan *Pseudomonas* U3 menggunakan metode *streak plate*. Hasilnya tidak menunjukkan zona hambat pada persinggungan antar isolat. Beberapa bakteri yang diisolasi dari lahan gambut seperti genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* mampu memproduksi enzim lignoselulolitik. Genus yang lain juga memiliki kemampuan menyediakan nitrat, melarutkan fosfat dan kalium serta memproduksi hormon *Indole-3-Acetic Acid* (IAA), sehingga berpotensi digunakan sebagai *biofertilizer* untuk memperbaiki nutrisi lahan gambut.

**Kata Kunci**—*Biofertilizer*, Endogenik, Gambut, Lignoselulolitik, Sinergisme.

## I. PENDAHULUAN

TANAH gambut merupakan tanah yang memiliki produktivitas rendah karena sedikitnya kandungan unsur hara baik mikro maupun makro yang menyebabkan tanah gambut menjadi tidak subur dan kurang layak digunakan sebagai lahan budidaya tanaman [1]. Supaya lahan gambut dapat difungsikan sebagai lahan budidaya tanaman perlu dilakukan rekayasa lahan untuk meningkatkan kandungan nutrisinya [2].

Bakteri endogenik lahan gambut dari genus *Bacillus* D1, D2, D3, U2, U4 dan *Pseudomonas* U3 yang diisolasi dari Desa Bereng Bengkel, Kalimantan Tengah dapat mendekomposisi serat gambut sebesar 80% menghasilkan detritus yang lebih kecil [3].

Bakteri dapat mendekomposisi lignoselulosa yang berasal dari serat-serat tanaman melalui mekanisme enzimatik menjadi detritus yang lebih kecil. Dekomposisi tersebut akan menyediakan nutrisi, terutama karbon, nitrogen dan fosfor [4]. Selain itu, dekomposisi bahan organik dapat membentuk humus yang terdiri dari senyawa C sederhana, asam humat, asam humin, dan asam fulvat [5]. Asam tersebut merupakan sumber muatan negatif dan tempat pengikatan unsur-unsur hara seperti fosfat dan kalium [6].

Bakteri lahan gambut dapat dikonsorsiumkan sehingga mampu meningkatkan kemampuan metabolisme bakteri dalam mendegradasi lignoselulosa dan berpotensi sebagai agen *biofertilizer* untuk meningkatkan kesuburan lahan gambut [7].

Kesuburan lahan gambut di Desa Bereng, termasuk kategori Oligotrofik - Mesotrofik yang memiliki kandungan

unsur hara makro N 0,7%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,05-0,25% dan K<sub>2</sub>O 0,03-0,10% [5]. Jumlah minimum unsur hara makro berdasarkan SNI (19-7030-2004) yang dibutuhkan tanaman P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,1%, K<sub>2</sub>O 0,2%, dan N 0,4%. Rendahnya ketersediaan unsur N, P, K yang dibutuhkan tanaman pada tanah gambut perlu dilakukan peningkatan melalui bioaugmentasi bakteri endogenik yang berpotensi sebagai *biofertilizer* [2].

Konsorsium beberapa genus bakteri lahan gambut dapat dikembangkan sebagai *biofertilizer* sehingga dapat meningkatkan kesuburan tanah gambut terutama ketersediaan unsur hara makro NPK [8].

## II. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Sinergisme dan Konsorsium Bakteri

Uji sinergisme antar terhadap *Bacillus* D1, D2, D3, U2, U4 dan *Pseudomonas* U3 dengan metode *cross streak* tidak terbentuk zona hambat (Gambar 1), hal tersebut menandakan seluruh isolat bersifat sinergis dan berpotensi dikonsorsium untuk diaplikasikan sebagai *biofertilizer* [9].

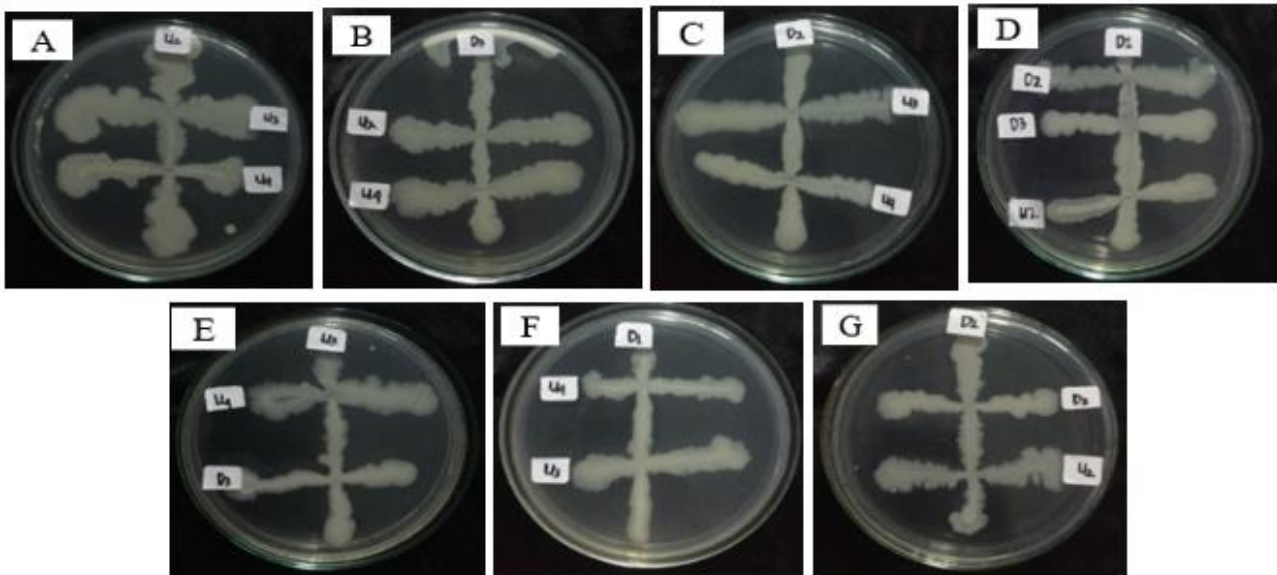
Terbentuknya zona hambat pada persinggungan antar isolat disebabkan adanya persaingan mendapatkan nutrisi [10], juga kompleksitas sumber karbon karena bakteri cenderung berinteraksi secara sinergis dalam menurunkan substrat kompleks dilingkungan yang sama sehingga cenderung bersaing jika sumber karbon jumlahnya terbatas [11].

Pertumbuhan sinergis antar isolat bakteri dalam konsorsium masih belum diketahui dengan pasti, namun beberapa penelitian menduga disebabkan karena beberapa faktor antara lain: (1) salah satu anggota genus mampu menyediakan satu atau lebih faktor nutrisi yang tidak dapat disintesis oleh anggota genus yang lain, (2) produk hasil metabolisme satu spesies dapat dimanfaatkan oleh spesies lain atau antar kedua spesies dapat saling memanfaatkan hasil metabolisme yang diproduksi [7]. (3) beberapa spesies bakteri sampai akhir masa pertumbuhan dapat menghasilkan metabolit yang beracun tetapi dapat dimanfaatkan oleh spesies lain sehingga menciptakan kondisi timbal balik yang saling menguntungkan [11].

Penggunaan isolat yang sinergis dalam konsorsium bakteri penting untuk meningkatkan kemampuan bakteri sebagai agen *biofertilizer* sebab bakteri yang sinergis memberikan efek positif pada bakteri lain sehingga dapat dikultur bersama-sama [12].

### B. Dekomposisi Bahan Organik

Gambut yang tersusun lignin, selulosa, dan hemiselulosa dapat didekomposisi menjadi senyawa organik yang lebih



Gambar 1. Hasil uji sinergisme antar isolat : (A) sinergisme isolat U2 terhadap U3 dan U4, (B) sinergisme isolat D3 terhadap U2 dan U4, (C) sinergisme isolat D2 terhadap U3 dan U4, (D) sinergisme isolat D1 terhadap D2, D3 dan U2, (E) sinergisme isolat U3 terhadap D3 dan U4, (F) sinergisme isolat D1 terhadap U4 dan U3, (G) sinergisme isolat D2 terhadap D3 dan U2.

seederhana oleh bakteri lignoselulolitik secara enzimatik. Enzim tersebut adalah selulase, Lignin Peroksidase (LiP), Manganase Peroksidase (MnP), dan Laccase (Lac) [13]. Enam isolat bakteri endogenik lahan gambut, genus *Bacillus* D1, D2, D3, U2, U4 dan *Pseudomonas* U3 mampu memproduksi selulase dan Lip sehingga mampu mendekomposisi bahan organik lebih tinggi dibandingkan control, persentase dekomposisi mencapai 80% [3].

Berdasarkan penelitian Zulaika *et al*, aktivitas selulase optimum terjadi pada pH 5 dengan aktivitas tertinggi pada *Bacillus* U4 997,4 U/ml [14]. Suhu optimal terjadi pada suhu 30°C dan 40°C dengan aktivitas selulase tertinggi *Bacillus* D3 (1746.1 U/ml) dan pada suhu 40°C adalah *Bacillus* D2 (1718.7 U/ml). Waktu inkubasi optimal adalah 12 jam dengan aktivitas selulase tertinggi pada *Pseudomonas* U2 (957,7 U/ml).

Penelitian lain melaporkan, genus *Staphylococcus*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* juga merupakan bakteri selulolitik. Aktivitas selulase nya setelah inkubasi 72 jam pada medium tandan buah kosong kelapa sawit, *Bacillus* (0,1012 U/ml), *Pseudomonas* (0,0327 U/ml), dan *Staphylococcus* (0,0818 U/ml) [15].

Perbedaan aktivitas selulase yang dihasilkan dari berbagai penelitian karena ada perbedaan waktu inkubasi [14], selain substrat juga berpengaruh, CMC lebih efektif digunakan dibandingkan dengan substrat tandan buah kosong kelapa sawit, karena aktivitas enzim spesifik untuk setiap substrat, dan memiliki perbedaan dalam memotong rantai selulosa menjadi molekul yang lebih sederhana [16].

Selulase adalah enzim ekstraseluler bakteri [17], dapat menghidrolisis ikatan  $\beta$ -1,4-glikosidik pada selulosa. Selulase terdiri dari tiga unit enzim yaitu endo-1,4- $\beta$ -glukanase menghidrolisis bagian amorf rantai selulosa dan menghasilkan oligosakarida; exo-1,4- $\beta$ -glukanase menghidrolisis oligosakarida menjadi selobiosa, dan  $\beta$ -D-glukosida glukanhidrolase menghidrolisis selobiosa dan oligosakarida menjadi glukosa sebagai produk akhir [18].

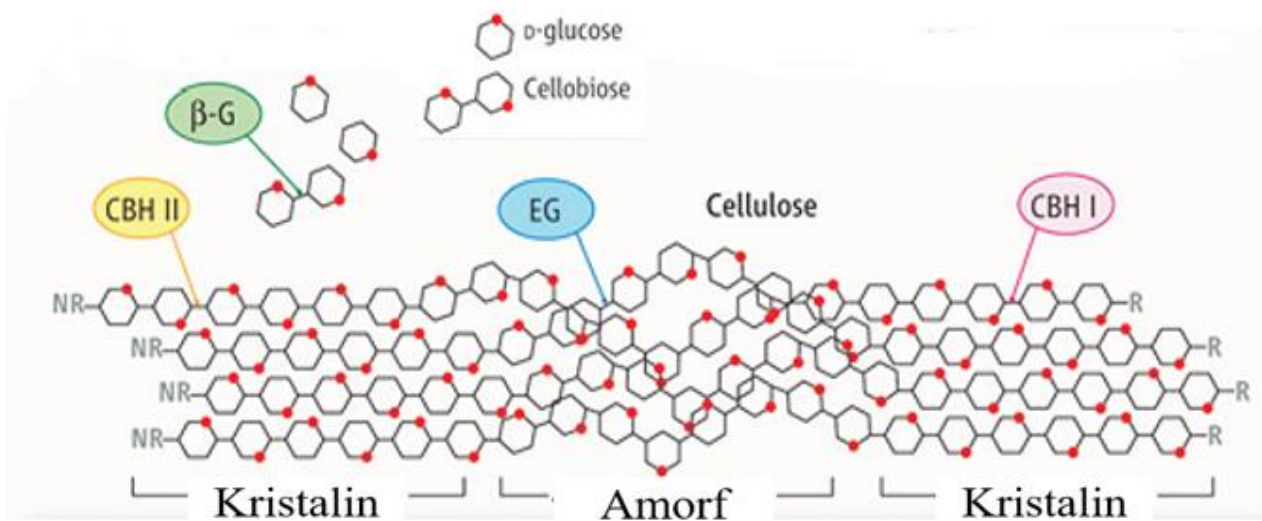
Mekanisme degradasi selulosa secara enzimatik disajikan pada Gambar 2.

Isolat D1, D2, D3, U2, U3, dan U4 juga mampu menghasilkan Lignin Peroksidase (LiP) yang merupakan enzim pendegradasi lignin. Uji skrining bakteri lignolitik diketahui dengan terbentuknya zona bening pada media Luria-Bertani agar dengan penambahan pewarna *methylene blue* [3], karena memiliki struktur kimia menyerupai lignin. Dekolorisasi *methylene blue* adalah indikator kemampuan oksidasi dari lignin peroksidase dalam mendegradasi lignin [19]. Beberapa isolat lain, juga mampu menghasilkan zona bening yaitu *Burkholderia* sp. dan *Serratia* sp. [20]. LiP adalah glikoprotein yang mengandung heme dengan gugus *iron protoporphyrin* yang dapat mendegradasi lignin dan senyawa fenolik dengan adanya co-substrat H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan mediator seperti *veratryl alcohol* (VA) [21]. LiP dapat memotong ikatan C-C dan mengoksidasi benzyl alkohol menjadi aldehid atau keton [22].

Bakteri dari perkebunan kelapa sawit *Bacillus*, *Leucobacter*, dan *Ochrobactrum* memproduksi tiga enzim utama yaitu laccase, MnP, dan LiP sehingga mampu mendegradasi lignin, aktivitas bakteri memproduksi enzim tersebut dipengaruhi oleh suhu dan pH lingkungan [23]. MnP merupakan enzim oksidoreduktase yang mengandung heme, memiliki kemampuan degradasi lignin lebih tinggi dibandingkan dengan laccase. MnP juga mengandung glikoprotein yang membutuhkan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebagai oksidan [24], sedangkan laccase merupakan enzim oksidoreduktase yang mengandung tembaga [21] dan mampu mengoksidasi berbagai senyawa fenolik menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron [25].

### C. Bakteri Penyedia Nitrat

Nitrogen adalah salah satu nutrisi penting untuk pertumbuhan semua organisme hidup termasuk tanaman dan bakteri. Bakteri fiksasi nitrogen mampu berperan dalam mengubah N<sub>2</sub> menjadi amonia sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanaman [26].



Gambar 2. Mekanisme degradasi selulosa secara enzimatik (Dutta & Kevin 2014).

Keterangan : CBH II= exo-  $\beta$ -1,4-glukanase bekerja pada ujung NR, CBH I= exo-  $\beta$ -1,4-glukanase bekerja pada ujung R,  $\beta$ -G=  $\beta$ -glucosidase, EG= endo-  $\beta$ -1,4-glukanase.

Bakteri endogenik lahan gambut yang mempunyai kemampuan menambat nitrat berpotensi digunakan sebagai *biofertilizer* untuk memperbaiki nutrisi lahan, beberapa bakteri endogenik lahan gambut yang memiliki kemampuan menambat nitrat melalui uji kualitatif pada media *Nitrogen Free Bromothymol blue* (NFB) adalah *Bacillus cereus*, *Paenibacillus illinoisensis*, *Paenibacillus wynnii*, *Cupriavidus pauculus*, *Mycobacterium cubense*, *Bacillus salaries*, *Paenibacillus glucanoliticus*, *Paenibacillus peoriae*, *Paenibacillus peoriae*, *Bacillus pumilus*, *Nocardia jiangxiensis* [8].

*Rhodopseudomonas palustris* yang diisolasi dari hutan rawa gambut, secara kuantitatif dengan pH 4,5 mampu menambat nitrogen 3,23 mg/L, hal tersebut menunjukkan bakteri dari lahan gambut dapat menambat nitrat meskipun dalam lingkungan asam sehingga berpotensi digunakan sebagai agen *biofertilizer* pada tanah gambut [27]. Bakteri selulolitik dengan kemampuan menambat nitrogen merupakan bakteri yang berpotensi digunakan sebagai agen *biofertilizer* pada tanah gambut karena bakteri mampu mendegradasi selulosa menjadi humus dan mampu menyediakan nitrat melalui fiksasi nitrogen [28]. Hal tersebut sesuai dengan peraturan menteri pertanian No. 70 tahun 2011 dimana standar kualitas pupuk hayati majemuk harus memiliki kemampuan menambat nitrogen dan mendekomposisi bahan organik. Fiksasi nitrogen secara biologi menggunakan enzim nitrogenase yang mengubah reduksi  $N_2$  atmosfer menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman, gen *nifH* merupakan gen fungsional yang mengkatalis reaksi reduksi nitrogen oleh nitrogenase [29]. Nitrogenase memiliki tiga isozim yaitu molibdenum (Mo)-nitrogenase, vanadium (V)-nitrogenase dan besi (Fe)-nitrogenase [30].

#### D. Bakteri Pelarut Fosfat

Ketersediaan P pada tanah gambut ditentukan oleh tingkat dekomposisi gambut, tingkat kematangan gambut (sapric) yang mempunyai kadar P-tersedia yang lebih tinggi [31].

Bakteri pelarut fosfat berpotensi meningkatkan fosfat terlarut pada tanah terutama pada tanah gambut yang mengalami defisiensi fosfat [32]. Aktivitas bakteri tanah dapat melarutkan fosfat melalui sekresi asam organik atau mineralisasi, asam-asam organik yang dihasilkan oleh bakteri menjadi tersedia bagi tanaman [33].

Pemanfaatan bakteri pelarut fosfat *Burkholderia gladioli* telah diuji pada bibit kelapa sawit dan mampu meningkatkan pertumbuhan bibit kelapa sawit dan kesuburan tanaman [34]. Bakteri lain *Rhodopseudomonas palustris* juga berpotensi melarutkan fosfat melalui uji kuantitatif pada medium pikovskaya pada pH 4,5. Bakteri tersebut dapat melarutkan fosfat dari sumber fosfat  $Ca_3(PO_4)_2$  sebesar 511,67 mg/L,  $AlPO_4$  289,33 mg/L dan  $FePO_4$  602,67 mg/L [29].

Potensi bakteri endogenik lahan gambut yang dapat melarutkan fosfat dapat digunakan sebagai *biofertilizer*, sesuai dengan peraturan menteri pertanian No. 70 tahun 2011, standar kualitas pupuk hayati harus memiliki kemampuan melarutkan fosfat. Bakteri tersebut dapat dikonsorsiumkan dengan bakteri lain yang memiliki kemampuan dalam menambat nitrat, melarutkan kalium dan memproduksi hormon auksin [35]. Mekanisme melarutkan fosfat melalui mineralisasi P organik yang berasal dari residu tanaman, hewan dan bakteri melalui sekresi asam organik. Mineralisasi P organik dilakukan dengan bantuan tiga enzim utama yaitu fosfatase, phytase dan phosphonatase [36]. Bakteri tanah menghasilkan enzim fosfatase basa jika dilingkungan basa dan sebaliknya [37]. Enzim phytase berperan dalam mineralisasi P organik tanah melalui degradasi *phytate* menyebabkan pelepasan P dari asam *phytate* [36]. Phosphonatase dan C-P lyases merupakan enzim yang melepaskan P dengan menghidrolisis ikatan C-P dari organophosponat [38].

Mekanisme pelarutan fosfat anorganik oleh bakteri dapat dilakukan melalui sekresi asam organik seperti *gluconic acid*, *oxalic acid*, *tartaric acid* dan *lactic acid*. Aktivitas pelarutan fosfat dapat diketahui dari kemampuan biokimia

bakteri dalam menghasilkan asam organik yang mampu mengkelat kation  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{2+}$  dan ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang berikatan dengan fosfat melalui gugus karboksilnya sehingga fosfat lepas dan menjadi terlarut [39]. Mineral fosfat anorganik pada tanah masam umumnya terikat sebagai  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sedangkan pada tanah basa terikat sebagai  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_4$  [40].

#### E. Bakteri Pelarut Kalium

Defisiensi unsur K pada tanah menjadi faktor pembatas untuk perkembangan tanaman dan hasil pertanian. Bakteri pelarut kalium merupakan mikroorganisme yang efektif dalam melarutkan K pada tanah dan berguna memperbaiki kandungan nutrisi tanah [41]. Bakteri pelarut kalium berpotensi digunakan sebagai agen *biofertilizer* pada tanah yang mengalami defisiensi nutrisi seperti tanah gambut [32]. Penelitian mengenai potensi bakteri pelarut kalium yang diisolasi dari tanah gambut sangat terbatas, namun terdapat beberapa bakteri yang diisolasi dari tanah rizosfer dan memiliki kemampuan melarutkan kalium pada kondisi asam seperti pada kondisi tanah gambut. Bakteri tersebut adalah *Enterobacter hormaechei* yang memiliki zona pelarutan kalium pada media aleksandrov agar 1,57 cm dan mampu bertahan pada kondisi pH 5 [42]. Genus bakteri lain yang diisolasi dari tanah masam pH 5,6 mampu melarutkan kalium dengan uji kuantitatif pada media aleksandrov cair adalah *Pseudomonas* sp. 37 mg/L dan *Acinetobacter calcoaceticus* 24 mg/L [43].

Selain berperan dalam melarutkan kalium *Pseudomonas* sp. berpotensi mendegradasi selulosa, secara optimum pada suhu 30°C dan pH 5 [44]. Pelarutan K dipengaruhi kondisi lingkungan seperti kandungan oksigen, temperatur dan pH. Secara umum bakteri pelarut kalium memiliki kondisi optimum pada pH 6-7 dan temperatur 25-30 °C [45].

Bakteri yang berpotensi melarutkan kalium dan mendegradasi selulosa berpotensi digunakan sebagai *biofertilizer* untuk meningkatkan nutrisi lahan gambut. Sesuai dengan peraturan menteri pertanian No. 70 tahun 2011, kualitas pupuk hayati harus memiliki kemampuan melarutkan kalium melalui uji pada media aleksandrov. Bakteri tersebut dapat dikonsorsiumkan dengan bakteri lain yang memiliki kemampuan dalam menambat nitrat, melarutkan kalium dan memproduksi hormon auksin untuk memperbaiki nutrisi lahan [35].

Bakteri menggunakan mekanisme melarutkan kalium dengan memproduksi asam organik, sekresi polisakarida dan pembentukan biofilm [46]. Asam-asam organik yang dihasilkan akan menurunkan pH rizosfer, dan meningkatkan kelarutan kation esensial seperti Fe, K, dan Mg [47]. Diantara berbagai asam organik yang terlibat dalam pelarutan K adalah asam glukonat, asam suksinat, asam  $\alpha$ -ketoglukonat, asam oksalat, asam sitrat, asam malat, asam asetat, dan asam laktat [48].

Mekanisme lain yang digunakan oleh bakteri dalam melarutkan kalium adalah sekresi polisakarida, bakteri tertentu menghasilkan *exopolysaccharida* yang membentuk selubung di sekitar sel bakteri yang berkontribusi pada mekanisme pelepasan kalium dari silikat [49]. Polisakarida menyerap asam organik dan mengandung gugus fungsional ( $-\text{COO}-$ ) yang membentuk kompleks dengan ion mineral, dapat meningkatkan solubilisasi K [47].

#### F. Bakteri Penghasil IAA

IAA merupakan hormon golongan auksin yang secara langsung dapat mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman, tumbuhan dapat menghasilkan fitohormon sendiri tetapi dapat juga memanfaatkan dari sumber yang diproduksi oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur [50]. Bakteri endogenik lahan gambut berpotensi menghasilkan IAA [27]. Biosintesis hormon IAA pada tanah oleh bakteri dipicu oleh triptofan yang berasal dari eksudat rizosfer atau sel-sel yang rusak [51].

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa bakteri endogenik lahan gambut yang mampu memproduksi hormon IAA diantaranya *Bacillus cereus* sebesar 8,27 ppm, *Bacillus soli* sebesar 139,52 ppm dan *Bacillus pumilus* sebesar 21,89 dan *Rhodococcus equi* sebesar 47,26 [8]. *Bacillus* merupakan genus dengan produksi IAA yang tinggi dan dapat menggunakan substrat untuk mensintesis hormon IAA [52] [53]. Bakteri penghasil hormon IAA yang diisolasi dari lahan gambut mampu bertahan pada kondisi asam meskipun beberapa bakteri mengalami penurunan kepadatan sel seiring dengan menurunnya pH lingkungan [8].

Prekursor utama jalur biosintesis IAA pada bakteri adalah triptofan, terdapat dua jalur biosintesis utama yaitu *Trp dependent* dan *Trp independent* [54]. Pada jalur *trp independent* bakteri tidak menggunakan L-triptofan sebagai prekursor melainkan menggunakan *indole-3-glycerol phosphate* (IGP) [55], namun jalur intermediet dan gen yang terlibat pada *trp-independent* masih belum terdefinisi. Sedangkan pada jalur *trp dependent* terdapat 5 jalur biosintesis pada bakteri, yaitu *indole-3-acetamide* (IAM), *indole-3-pyruvic acid* (IPA), *Tryptamine* (TRA), *Tryptophan side-chain oxidase*, dan *indole-3-acetonitrile* (IAN) dimana IPA, IAM dan IAN merupakan jalur utama biosintetik IAA pada bakteri [54].

### III. KESIMPULAN/RINGKASAN

Bakteri endogenik lahan gambut dari genus *Bacillus* D1, D2, D3, U2, U4, dan *Pseudomonas* U3 bersinergis antara isolat satu dengan yang lain. Beberapa bakteri lain, baik Gram positif maupun negatif yang diisolasi dari lahan gambut juga memiliki kemampuan mendegradasi gambut, menyediakan nitrat, melarutkan fosfat dan kalium serta memproduksi hormon IAA sehingga berpotensi digunakan sebagai agen *biofertilizer* untuk memperbaiki nutrisi lahan gambut.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Widyati and T. Rostiwati, "Memahami sifat-sifat tanah gambut untuk optimasi pemanfaatan lahan gambut," *Mitra Hutan Tanam.*, vol. 51, no. 2, pp. 51–68, 2010.
- [2] Hikmatullah and Sukarman, "Physical and chemical properties of cultivated peat soils in four trial sites of ICCTF in Kalimantan and Sumatra, Indonesia," *J. Trop. Soil.*, vol. 19, no. 3, pp. 131–141, 2010.
- [3] F. Solikhah and E. Zulaika, "Peat endogenous lignocellulolytic bacteria for humic waste decomposition," *J. Phys.*, vol. 1108, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- [4] K. Jaiboon, N. Lertwattanasakul, P. Limtong, and S. Limtong, "Yeasts from peat in a tropical peat swamp forest in Thailand and their ability to produce ethanol, indole-3-acetic acid and extracellular enzyme," *Mycol. Prog.*, vol. 15, pp. 755–770, 2010.
- [5] W. Hartatik, I. G. M. Subiksa, and A. Dariah, *Pengolaan Lahan Gambut Berkelanjutan: Sifat Kimia Dan Fisik Tanah Gambut*.

- Bogor: Balai Penelitian Tanah, 2010.
- [6] E. Saptiningsih and S. Haryanti, "Kandungan selulosa dan lignin berbagai sumber bahan organik setelah dekomposisi pada tanah latosol," *Bul. Anat. dan Fisiol.*, vol. 32, no. 2, pp. 34–42, 2015.
  - [7] A. C. Asri and E. Zulaika, "Sinergisme antar isolat azotobacter yang dikonsorsiumkan," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 57–59, 2016.
  - [8] E. Pratiwi, T. D. Satwika, A. Akhdiya, and F. Agus, "Karakteristasi bakteri asal lahan gambut jambi dan potensinya sebagai pupuk hayati," *J. Tanah dan Iklim*, vol. 44, no. 1, pp. 1–10, 2015.
  - [9] S. N. Ethica, R. Muslim, B. I. Widyawardhana, A. Firmansyah, S. I. Muchlissin, and S. Darmawati, "Synergism and antagonism among indigenous hydrolytic bacteria from biomedical wastes for the generation of bacterial consortium used as bioremediation agent," *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 10, no. 12, pp. 440–444, 2015.
  - [10] K. L. Ryplen, J. R. Ward, and F. Azam, "Antagonistic interactions among coral-associated bacteria," *Environmental Microbiol.*, vol. 12, no. 1, pp. 28–39, 2015.
  - [11] Y. J. Deng and S. W. Wang, "Synergistic growth in bacteria depends on substrate complexity," *J. Microbiol.*, vol. 54, no. 1, pp. 23–30, 2015.
  - [12] N. M. Badiger, K. S. Jagadeesh, P. U. Krishnaraj, and S. Mogali, "Effect of inoculation of microbial consortia on growth parameters of green gram (*Vigna radiata* L.)," *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, vol. 8, no. 10, pp. 562–567, 2019.
  - [13] R. L. Mondejar, C. Algora, and P. Baldrian, "Lignocellulolytic systems of soil bacteria: a vast and diverse toolbox for biotechnological conversion processes," *J. Biotechnol. Adv.*, vol. 37, no. 6, pp. 1–23, 2019.
  - [14] E. Zulaika, N. Wahyuningsih, N. H. Alami, N. D. Kuswytasari, M. Shovitri, and N. E. Mochtar, "Cellulase activity of cellulolytic bacteria isolatd from palangkaraya peat, central kalimantan," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 10, pp. 888–893, 2018.
  - [15] Gusmawartati, Agustian, Herviyanti, and Jamsari, "Isolation of cellulolytic bacteria from peat soil as decomposer of oil palm empty fruit bunch," *J. Trop. Soil*, vol. 22, no. 1, pp. 47–53, 2017.
  - [16] M. Dasthban, M. Maki, K. T. Leung, C. Mao, and W. Qin, "Cellulase activities in biomass conversion: measurement methods and comparison," *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 30, no. 4, pp. 302–309, 2010.
  - [17] D. Sukmawati, D. Dellanerra, and A. Risandi, "Screening the capabilities of Indonesian indigenous mold in producing cellulase enzyme," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, no. 1, pp. 1–7, 2018.
  - [18] S. Chatterjee *et al.*, "Cellulase enzyme based biodegradation of cellulosic materials: an overview," *South Asian J. Exp. Biol.*, vol. 5, no. 6, pp. 271–282, 2015.
  - [19] V. Sasikumar, V. Priya, S. Shankar, and S. Sekar, "Isolation and preliminary screening of lignin degrading microbes," *J. Acad. Ind. Reasrch*, vol. 3, no. 6, pp. 291–294, 2014.
  - [20] M. A. A. Roslan, Z. A. Z. Abidin, and S. M. Omar, "Screening of ligninase-producing bacteria from south east pahang peat swamp forest soil," *Malays. J. Microbiol.*, vol. 12, no. 6, pp. 433–437, 2016.
  - [21] A. Kumar and R. Chandra, "Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment," *Heliyon J.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–18, 2020.
  - [22] R. M. Peralta, B. P. Silva, R. C. G. Correa, C. G. Kato, F. A. V. Seixas, and A. Bracht, *Biotechnology of Microbial Enzymes: Enzymes Form Basidiomycetes Peculiar And Efficient Tools For Biotechnology*. New Delhi: Elsevier Inc., 2017.
  - [23] N. H. A. Rahman, R. N. A. A., S. A. Aziz, and M. A. Hasan, "Production of ligninolytic enzymes by newly isolatd bacteria form palm oil plantation soil," *J. Bioresour.*, vol. 8, no. 4, pp. 6136–6150, 2013.
  - [24] R. Datta *et al.*, "Enzymatic degradation of lignin in soil: a review," *J. Sustain.*, vol. 9, pp. 1–18, 2017.
  - [25] U. Moilanen, M. Kellock, S. Galkin, and L. Viikari, "The laccase-catalyzed modification of lignin for enzymatic hydrolysis," *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 49, no. 6–7, pp. 492–498, 2011.
  - [26] B. S. Shridhar, "Nitrogen fixing microorganisms," *Int J Microbiol Res*, vol. 3, no. 1, pp. 46–52, 2012.
  - [27] P. Nookongbut, Kantachote, N. Q. Khuong, A. Sukhoom, M. Tantirungkij, and S. Limtong, "Selection of acid-resistant purple nonsulfur bacteria from peat swamp forests to apply as biofertilizers and biocontrol agents," *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 19, no. 3, pp. 488–500, 2019.
  - [28] J. D. Harindintwali, J. Zhou, and X. Yu, "Lignocellulosic crop residue composting by cellulolytic nitrogen fixing bacteria: a novel tool for environmental sustainability," *Sci. Total Environ.*, vol. 715, no. 136912, pp. 1–17, 2020.
  - [29] J. P. Bellenger, Y. Xu, X. Zhang, F. M. Morel, and A. M. L. Kraepiel, "Possible contribution of alternative nitrogenases to nitrogen fixation by asymbiotic N<sub>2</sub>-fixing bacteria in soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 69, no. 30, pp. 413–420, 2014.
  - [30] K. E. Luxem, A. M. L. Kraepiel, L. Zheng, J. R. Waldbauer, and X. Zhang, "Carbon substrate re-orders relative growth of a bacterium using mo-, v-, or fe-nitrogenase for nitrogen fixation," *Environ. Biol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1397–1408, 2020.
  - [31] M. Noor, Masganti, and F. Agus, *Lahan Gambut Indonesia: Pembentukan dan Karakteristik Gambut Tropika Indonesia*. Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2016.
  - [32] L. Parlinah, S. J. Hamdani, A. Nurbaty, and A. Nuraini, "Phosphate solubilizing-based peat soil carier applied to potato," *J. Agric. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 258–264, 2020.
  - [33] E. Pratiwi, T. D. Satwika, and F. Agus, "Keanekaragaman mikroba tanah gambut di bawah hutan dan di bawah perkebunan sawit di provinsi jambi," *J. Tanah Dan Iklim*, vol. 42, no. 1, pp. 69–78, 2019.
  - [34] I. N. Istina, H. Widiastuti, B. Joy, and M. Antralina, "Phosphate-solubilizing microbe from sapristis peat soil and their potency to enhance oil palm growth and p uptake," *Procedia Food Sci.*, vol. 3, pp. 426–435, 2015.
  - [35] R. Bhattacharjee and U. Dey, "Biofertilizer, a way towards organic agriculture: rreview," *African J. Microbiol. Res.*, vol. 8, no. 24, pp. 2332–2342, 2014.
  - [36] A. Kumar, "Phosphate solubilizing bacteria in agriculture biotechnology: diversity, mechanism and their role in plant growth and crop yield," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 116–124, 2016.
  - [37] R. S. Annisa and E. Zulaika, "Skrining konsorsium azotobacter penghasil fosfatase," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 6, no. 2, pp. 25–26, 2017.
  - [38] A. P. Nandimath, K. R. Kharat, S. G. Gupta, and A. S. Kharat, "Optimization of cellulase production for bacillus sp. and pseudomonas sp. soil isolates," *African J. Microbiol. Res.*, vol. 10, no. 13, pp. 410–419, 2016.
  - [39] M. Billah, M. Khan, A. Bano, T. U. Hassan, A. Munir, and A. R. Gurmani, "Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: keys for sustainable agriculture," *Geomicrobiol. J.*, vol. 36, no. 10, pp. 904–916, 2019.
  - [40] A. Islamiati and E. Zulaika, "Potensi azotobacter sebagai pelarut fosfat," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 2, no. 1, pp. 2337–3520, 2015.
  - [41] S. P. Goswami, B. R. Maurya, A. N. Dubey, and N. K. Singh, "Role of phosphorus solubilizing microorganisms and dissolution of insoluble phosphorus in soil," *IJCS*, vol. 7, no. 3, pp. 3905–3913, 2019.
  - [42] I. Bahadur, V. S. Meena, and S. Kumar, "Importance and application of potassic biofertilizer in indian agriculture," *Int. Res. J. Biol. Sci.*, vol. 2, no. 12, pp. 80–85, 2014.
  - [43] K. B. Prajapati and H. A. Modi, "Isolation and characterization of potassium solubilizing bacteria from ceramic industry soil," *CIBTech J Microbiol*, vol. 1, pp. 8–14, 2019.
  - [44] A. Castillo, M. Gerding, P. Oyarzúa, E. Zagal, J. Gerding, and S. Fischer, "Plant growth-promoting rhizobacteria able to improve NPK availability: selection, identification and effects on tomato growth," *Chil. J. Agric. Res.*, vol. 79, no. 3, pp. 473–485, 2019.
  - [45] A. Verma, Y. Patidar, and A. Vaishampayan, "Isolation and purification of potassium solubilizing bacteria from different regions of India and its effect on crop's yield," *Indian J Microbiol Res*, vol. 3, no. 4, pp. 483–488, 2016.
  - [46] D. Padhan, P. Sen, S. Adhikary, R. Kundu, and V. K. Yadav, "Potassium solubilisation in soils: mechanisms, effect on plant growth and future prospects," *Curr. Res. Vertility*, vol. 1, pp. 37–60, 2019.
  - [47] A. Sattar *et al.*, "Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: a review," *J. Appl. Soil Ecol.*, vol. 133, pp. 146–159, 2018.
  - [48] S. Masood and A. Bano, *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture: Mechanism of Potassium Solubilization in the Agricultural Soils by the Help of Soil Microorganisms*. New Delhi: Springer, 2016.
  - [49] M. Saha, B. R. Maurya, B. Bahadur, A. Kumar, and V. S. Meena, *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture: Can Potassium-Solubilising Bacteria Mitigate the Potassium Problems in India*. New Delhi: Springer, 2016.
  - [50] S. Khan, A. Zaidi, and E. Ahmad, *Phosphate Solubilizing Microorganisms: Mechanism of Phosphate Solubilization and Physiological Functions of Phosphate-Solubilizing Microorganisms*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
  - [51] T. K. Dewi, J. Suryanggono, and D. Agustiyani, "Isolasi dan uji aktivitas bakteri penghasil hormon tumbuh IAA (indole-3-acetic acid) dan bakteri perombak protein dari tanah pertanian, tual, maluku tenggara," *Pros. Semin. Nas. Masy. Biodiversitas Indones.*, vol. 2, no. 2, pp. 271–276, 2016.

- [52] S. Wagi and A. Ahmed, "Bacillus spp.: potent microfactories of bacterial IAA," *Peer-Reviewed J.*, vol. 7, no. 7258, pp. 1–14, 2019.
- [53] Shahzad *et al.*, "Indoleacetic acid production and plant growth promoting potential of bacterial endophytes isolated from rice (*Oryza sativa* L.) seeds raheem," *Acta Biol. Hungaria*, vol. 68, no. 2, pp. 175–186, 2017.
- [54] S. F. Fu, J. Y. Wei, H. W. Chen, Y. Y. Liu, H. Lu, and J. Y. Chou, "Indole-3-acetic acid: A widespread physiological code in interactions of fungi with other organisms," *Plant Signal. Behav.*, vol. 10, no. 8, pp. 1–9, 2015.
- [55] D. Wei, C. Zhang, P. Luo, C. W. An, and G. Q. Guo, "The biosynthesis of auxin: how many paths truly lead to IAA?," *Plant Growth Regul.*, vol. 78, no. 3, pp. 275–285, 2015.