

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Salah satu komoditas perkebunan yang memiliki nilai ekonomi yang tinggi dan memiliki reputasi baik di pasaran lokal hingga internasional adalah kelapa sawit. Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) merupakan salah satu komoditi perkebunan utama di Indonesia sebagai sumber devisa, lapangan kerja dan sumber kesejahteraan bagi petani pengusahanya (Isra et al., 2025). Biaya produksi yang murah, produksi per ha yang tinggi, umur ekonomis yang panjang, risiko usaha yang kecil, persediaan yang cukup serta penggunaannya yang beraneka ragam sangat mengukuhkan daya saingnya dengan minyak nabati lainnya seperti kelapa (*Cocos nucifera*), biji bunga matahari (*Helianthus annuus*), kacang tanah (*Arachis hypogea*), kedelai (*Glycine max*), lobak (*Rapeseed* atau *Brassica napus*), biji kapas (*Gossypium*), zaitun (*Olive* atau *Olea europaea sativa*), wijen (*Sesamum indicum*) dan lain-lain.

Peran Indonesia sebagai produsen CPO dunia terus meningkat dan menjadi produsen tertinggi dari lima Negara produsen CPO terbesar di dunia yaitu Malaysia, Thailand, Kolombia dan Nigeria. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia tahun 2024 telah mencapai 17,3 juta hektar dengan luasan tanaman menghasilkan (TM) sebesar 14,88 juta hektar (Badan Pusat Statistik, 2025). Dengan realisasi pencapaian produksi CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO (*Palm Kernel Oil*) pada tahun 2024 sebesar 52,76 juta ton, Indonesia menguasai produksi sebesar 59% dari keseluruhan produksi CPO dunia, disusul Malaysia dengan 19,71 juta ton (26%), Thailand dengan 3,6 juta ton (5%) dan Kolombia 1,5 juta ton (2%) serta negara lainnya (GAPKI, 2025). Dengan produktivitas CPO (*Crude Palm Oil*) rata-rata nasional 3,36 ton/ha/tahun dan (*Kernel Palm Oil*) dengan produktivitas 0,32 ton/ha/tahun (GAPKI, 2025). Produktivitas produksi CPO tersebut masih jauh dari potensi produktivitas rata-rata nasional sebesar 6 – 7 ton/ha/tahun, demikian juga dengan produktivitas KPO berada di bawah potensi rata-rata nasional 0,5 – 0,7 ton/ha/tahun.

Rendahnya produktivitas rata-rata kelapa sawit di Indonesia disebabkan oleh tanaman tua, peremajaan sawit rakyat (PSR) yang lambat, kualitas bibit rendah/palsu, penerapan praktik agronomi kurang maksimal (pemupukan dan perawatan) serta akses petani ke modal dan teknologi terbatas, yang menyebabkan produktivitas kebun rakyat jauh di bawah korporasi (GAPKI, 2025). Pencapaian luas areal dan volume produksi kelapa sawit Indonesia tidak sejalan dengan produktivitas. Produktivitas kelapa sawit Indonesia tidak terlepas dari umur tanaman yang sebagian besar telah melampaui usia produktif (Kiki et al, 2022). Selain itu, terdapat indikasi penggunaan benih sapuan/palsu yang relatif signifikan sehingga menimbulkan kesenjangan hasil terhadap produktivitas (Ardana et al., 2022).

Tanaman kelapa sawit umumnya dibudidayakan pada tanah-tanah yang bereaksi masam di daerah tropis mulai dari yang subur dan sesuai untuk perkebunan kelapa sawit hingga lahan marginal yang kurang subur. Beberapa permasalahan yang dihadapi pada tanah di daerah tropis adalah sebagai berikut: pH tanah rendah (< 5.5), Kapasitas Tukar Kation (KTK) rendah, kehilangan hara yang tinggi akibat pencucian, curah hujan tinggi menyebabkan tingkat pencucian dan erosi tinggi (Kamarati dan Azwari, 2023). Kondisi tersebut diperparah dengan degradasi lahan ditandai dengan hilangnya kesuburan tanah akibat pemakaian pupuk yang berlebihan (Wang et al, 2018), penurunan kadar bahan organik secara keseluruhan, permukaan air tanah hilang dengan cepat akibat eksploitasi air tanah secara berlebihan, salinitas tanah meningkat akibat drainase yang buruk, peningkatan residu bahan kimia di dalam air tanah dan hilangnya keanekaragaman hayati oleh sistem monocropping dalam rentang waktu yang lama (Wahyuni & Suranto, 2021; Stepha, 2022).

Kerusakan tanah yang terjadi tersebut sangat potensial untuk diperbaiki untuk mengembalikan potensi kesuburannya dengan perbaikan kondisi fisik, kimia dan biologinya. Diperlukan berbagai upaya untuk memperbaiki kondisi ekosistem tanah agar mampu meningkatkan retensi air serta perbaikan status hara tanah. Diperlukan bahan pembenah tanah alternatif yang sulit terdekomposisi sehingga dapat bertahan dalam rentang waktu yang cukup lama. Salah satu alternatif pembenah tanah yang dapat digunakan adalah biochar yang kaya akan bahan organik memiliki kapasitas yang baik dalam menyimpan air dan perbaikan kondisi tanah. Biochar memiliki daya tahan yang lebih lama di dalam tanah dibanding bahan organik lainnya dalam peningkatan kesuburan tanah (Okalia et al., 2021). Biochar merupakan salah satu bahan alami yang terbentuk melalui proses pembakaran biomassa dalam kondisi oksigen terbatas ataupun tanpa oksigen sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanah sebagai sumber bahan organik. Dalam hal ini, *biochar* akan terakumulasi di dalam tanah dengan menjaga keseimbangan sifat-sifat tanah untuk meminimalkan risiko pencucian hara dan pada akhirnya berdampak pada peningkatan kualitas lingkungan (Rini, S. et al., 2023).

Biochar merupakan bahan padat kaya akan karbon hasil konversi dari limbah organik (biomassa Pertanian) melalui pembakaran (*Pyrolysis*) tidak sempurna atau suplai oksigen terbatas (Situmeang, 2020). Secara umum, biochar dikenal sebagai arang aktif atau arang hitam yang terbentuk dari hasil pembakaran biomassa limbah pertanian dalam kondisi tanpa atau minim oksigen, yang menghasilkan kandungan karbon (C) yang tinggi dengan sifat fisik dan kimia yang stabil (Nitsae & Solle, 2023; Ravindiran et al., 2024). Pembakaran dilakukan dalam keadaan oksigen rendah atau tanpa oksigen (Amalina et al., 2022a, 2022b), yang menghasilkan tiga substansi yaitu metana dan

hydrogen yang dapat dijadikan sebagai bahan bakar, bio-oil dan arang hayati (biochar) yang mempunyai sifat stabil serta kaya akan karbon (Iswidayani & Sulhaswardi, 2022). Biasanya, hasil biochar berkisar antara 30 % ~ 60 % (Al-Rumaihi et al., 2022; Elkhailifa et al., 2022).

Waktu yang dibutuhkan untuk proses pembakaran hingga terbentuk biochar tergantung pada kadar air serta bentuk dan komposisi kimia limbah pertanian yang digunakan. Proses pembuatan biochar dilakukan melalui pirolisis pada suhu antara 300 sampai 550 °C dalam kondisi anaerob, yang menghasilkan lebih banyak biochar dengan kualitas yang lebih baik. Biochar yang dihasilkan dari proses ini terbukti efektif sebagai bahan pembenah tanah yang dapat meningkatkan kesuburan tanah (Farni et al., 2024). Suhu merupakan salah satu faktor kunci yang memiliki pengaruh besar terhadap hasil dari proses pirolisis, di suhu rendah akan terbentuk lebih banyak arang, sementara pada suhu yang tinggi produksi arang lebih sedikit (Herlambang, 2020). Parameter utama lainnya adalah waktu tinggal (*detention time*). Waktu tinggal yang lebih lama menyebabkan peningkatan dalam proses pemecahan zat yang berujung pada peningkatan produksi gas. Tar merupakan hasil uap yang berubah menjadi cair dan memiliki warna cokelat kehitaman yang dihasilkan selama proses pirolisis berlangsung (Asmunandar, 2022).

Temperatur selama proses produksi biochar sangat menentukan karakteristik biochar pada kandungan C, pH dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang dihasilkan (Ippolito et al., 2020; Sakhiya et al., 2020; Janu et al., 2021; Leng et al., 2021; Haider et al., 2024). Pembakaran tidak sempurna dapat dilakukan dengan alat pembakaran atau pirolisator dengan suhu 250-700 °C selama 1-3,5 jam, tergantung pada jenis biomas dan alat pembakaran yang digunakan (Ridhuan et al., 2019). Ini yang menyebabkan perbedaan karakteristik biochar seperti: pH, KTK, bahan volatil, adar abu, kandungan karbon, luas permukaan spesifik, dan porositas (Tomczyk et al., 2020; Jin dkk., 2024). Kualitas biochar sangat tergantung pada sifat kimia dan fisik biochar yang ditentukan oleh jenis bahan baku seperti kayu lunak, kayu keras, sekam padi, residu kelapa sawit, limbah hewan dan unggas (Wang dkk., 2020; Masud dkk., 2023).

Penggunaan biochar pada lahan pertanian terbukti mampu berfungsi sebagai bahan pembenah tanah dan mampu meningkatkan kualitas lahan dengan peningkatan pH tanah. Biochar selain mengandung unsur makro dan mikro seperti N,P,K dan Mg juga berguna untuk meningkatkan nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan pH tanah hingga peningkatan mencapai 40% (Arifai, 2022). Penggunaan biochar memberikan dampak positif terhadap karakteristik fisiokimia utama tanah, termasuk peningkatan pH, konduktivitas listrik, kapasitas menahan air, serta respirasi tanah menegaskan peran biochar dalam mendukung strategi pengelolaan tanah yang berkelanjutan (Singh et al., 2022). Pengaplikasian biochar pada lahan pertanian juga mampu meningkatkan produktivitas sehingga pendapatan petani juga meningkat, serta dapat mengurangi pencemaran pada tanah dan air yang diakibatkan pencucian oleh pupuk di dalam tanah (Abidin, 2021).

Biochar material kaya karbon (C) yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa organik, telah menunjukkan potensi yang signifikan untuk meningkatkan berbagai sifat tanah, seperti retensi hara, kapasitas menahan air, dan aktivitas mikroba (Yadav et al., 2023). Demikian juga peningkatan senyawa organik kompleks yang terbentuk dari dekomposisi bahan tumbuhan dan hewan—berperan penting dalam siklus hara, memperbaiki struktur tanah, dan memfasilitasi aktivitas mikroba, yang pada gilirannya mendukung ketersediaan dan transformasi hara esensial seperti nitrogen (Tiwari et al., 2023). Permukaan dan porositas biochar yang sangat besar berpotensi meningkatkan kualitas tanah secara signifikan seperti kapasitas tanah dalam menahan air (Sakhiya et al., 2020), Kapasitas Tukar Kation (KTK) (Dominggues et al., 2020), dan ketahanan tanaman terhadap penyakit (Feng et al., 2021; Rasool et al., 2021).

Besarnya manfaat biochar yang dihasilkan tidak mampu menggantikan peran pupuk sehingga perlu adanya penambahan hara dari pupuk lain agar dapat mempercepat efek terhadap tanaman. Satu alternatif yang dapat dilakukan untuk menambah ketersediaan unsur hara adalah dengan pengayaan mikroorganisme pada biochar sebagai sumber nutrisi dan pembawa mikroba untuk aplikasi tanah karena sifatnya yang sangat berpori, yang dapat meningkatkan kapasitas pembawa nutrisi dan mikroba (Ajeng et al., 2020; Khadem et al., 2021). Mikroorganisme memiliki peran potensial untuk dimainkan dalam produksi pertanian berkelanjutan karena kemampuannya untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik, memulihkan tanah yang terkontaminasi, mendaur ulang nutrisi, mengelola kesuburan tanah, dan cuaca serta mineralisasi batuan dan kemampuan lain yang menghasilkan pengurangan penggunaan pupuk atau pestisida di bidang pertanian (Rashid et al., 2019). Biochar merangsang terbentuknya ekosistem baru membentuk simbiosis mutualisme antara mikroorganisme dengan akar tanaman yang jangkauannya semakin melebar untuk mendapatkan nutrisi dan air yang dibutuhkan untuk pertumbuhan (Pratiwi & Nurrahma, 2024).

Beberapa sifat bahan biochar menjadi pendukung dan pembawa yang efektif untuk inokulum mikroba. Pori-pori dalam jumlah yang besar, yang cocok untuk kolonisasi mikroba dan perlindungan dari predator seperti protozoa, nematoda dan tungau. Biochar juga dapat menahan atau menyerap nutrisi yang penting bagi pertumbuhan mikroba (Das and Ghosh., 2021; Labanya et al., 2022). Pori-pori tersebut juga menyediakan situs aktif pada

permukaan biochar yang dapat menyerap kontaminan sehingga memungkinkan penyerapan dan biodegradasi secara bersamaan (Ha et al., 2022; Wu et al., 2022). pH biochar yang netral sedikit basa dan dapat memberikan beberapa kapasitas penyangga pH (Simansky et al., 2024), menyediakan habitat yang cocok bagi banyak mikroorganisme tanah.

Dengan porositas dan luas permukaan spesifiknya yang tinggi, biochar dapat menyediakan ruang hidup bagi mikroorganisme (Zhang et al., 2022). Fitur biochar yang mendukung tempat tinggal mikroba meliputi sejumlah besar C-Organik, nutrisi termasuk N, P, dan K, peningkatan porositas, dan kapasitas menahan air yang tinggi (Wu et al., 2021b). Mikroorganisme yang diperkenalkan dengan biochar memungkinkan peningkatan tingkat kelangsungan hidup, dan dengan demikian meningkatkan integrasi dan proliferasi dengan demikian meningkatkan integrasi dan proliferasi mikroba di tanah dan rizosfer tanaman (Azeem et al., 2021). Mikroba tanah ini diperlukan untuk meningkatkan kesehatan tanah dan memediasi siklus karbon dan nutrisi, proses biokimia tanah, dan pemulihan tanah yang terkontaminasi (Hasanuzzaman et al., 2024). Inokulan berbasis biochar terbukti efektif dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan pemulihan tanah yang terkontaminasi kontaminan organik semut (Tu et al., 2020).

Telah dibuktikan bahwa biochar meningkatkan aktivitas mikroba dalam remediasi tanah, terutama dalam konteks kontaminasi logam berat dan mencegah risiko keracunan unsur mikro, serta mengurangi potensi defisiensi nutrisi yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman (Marcinczyk et al., 2022). Dengan sifatnya yang berpori biochar bertindak sebagai habitat yang baik bagi kehidupan mikroba, dengan mendorong pertumbuhan dan aktifitasnya. Dengan peningkatan komunitas mikroba, polutan di pecah, dan kesuburan tanah secara umum meningkat. Menurut Vasic et al., (2023), biochar dapat mendorong pertumbuhan mikroorganisme lokal dan asing, yang meningkatkan pertumbuhan tanaman dan melumpuhkan logam berat. Biochar dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan enzimatis yang esensial untuk kesehatan tanah secara jangka panjang (Szara et al., 2023). Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan aktivitas mikroba dalam remediasi tanah dengan mengubah karakteristik tanah, menyerap polutan, dan mendorong transfer elektron dibandingkan dengan proses lainnya (Zhang et al., 2021).

Actinomycetes adalah kelompok bakteri yang memiliki peran dalam proses dekomposisi bahan organik dan dapat memproduksi senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi tanaman. Actinomycetes menyebar secara luas di seluruh ekosistem tanah, memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi ekstrim dan berperan penting mendukung pertumbuhan tanaman, terutama di daerah rhizosfer. Rhizosfer merupakan daerah perakaran tanaman yang mendukung perkembangan dan aktivitas diversitas komunitas mikroba termasuk kemampuan untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Wahyuni et al., 2024). Selain dari hal tersebut, produksi eksudat pada sel akar memberikan nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroba untuk tumbuh (Mirta et al., 2022). Populasi actinomycetes yang lebih tinggi di rhizosfer dibandingkan tanah non-rizhosfer disebabkan oleh eksudat akar yang kaya akan senyawa organik seperti asam amino dan gula. Eksudat ini tidak hanya menyediakan nutrisi bagi mikroorganisme, tetapi juga mendorong perkembangan simbiosis antara bakteri actinomycetes dengan akar tanaman, yang membantu dalam pelarutan fosfat dan produksi hormon pertumbuhan seperti IAA (Kurniafebi, 2021; Ratih et al., 2020; Kusrachdiyanti et al., 2020; Fitriana, 2021).

Populasi bakteri rhizosfer juga memiliki kemampuan untuk menghasilkan alginat serta berperan penting dalam fiksasi dan pelarutan fosfat (Jalal et al., 2023). Bakteri ini memainkan peran penting dalam ekosistem tanah, terutama dalam proses dekomposisi bahan organik dan kesuburan tanah (Oyedoh et al., 2023). Apabila kondisi tanah dan lingkungan baik, maka dapat dipastikan proses degradasi oleh mikroba akan meningkat (Gumelar dan Yunus., 2021). Isolasi bakteri tanah penghasil alginat perlu dilakukan karena memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kondisi kekeringan dengan mengaktifkan jalur superoksida dismutase (SOD), meningkatkan biomassa hingga 27% di bawah tekanan air (Burlakoti et al., 2024). Bakteri-bakteri tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber inokulum yang memiliki daya adaptasi kuat untuk diterapkan sebagai agen perbaikan tanah.

Peluang pemanfaatan biochar tergolong besar dengan melihat limbah organik sisa pertanian di Indonesia cukup tersedia. Residu pertanian tersebut merupakan sumber bahan organik secara berkelanjutan di dunia (Srivastava et al., 2020). Salah satu bahan baku yang cukup besar dalam pembuatan biochar adalah tandan kosong kelapa sawit yang kaya akan bahan organik belum dimanfaatkan secara optimal (Rezki et al., 2024). Ratnasari dkk. (2024), menunjukkan bahwa biochar dari TKKS memiliki kandungan nitrogen (N) 0,91%, fosfor (P) 0,03%, kalium (K) 0,67%, kadar abu 7,18%, pH 6,31, dan karbon organik 58,04%. Biomassa ini terus dihasilkan dalam jumlah yang cukup besar seiring dengan perkembangan luas areal perkebunan kelapa sawit Indonesia yang saat ini telah mencapai 17,3 juta hektar dengan total produksi CPO 52,76 juta ton/tahun (BPS, 2025). Dengan demikian ada sekitar 47,48 juta ton limbah yang berpotensi sebagai sumber bahan organik, 23% berupa tandan kosong kelapa sawit sebesar 11,52 juta ton/tahun (Hidayat et al., 2022).

Tandan kosong kelapa sawit mengandung sejumlah material penting yang dapat dimanfaatkan dan diolah menjadi material lain dengan nilai ekonomis yang lebih tinggi (Wicakso dkk., 2021). Selulosa, lignin, hemiselulosa,

air, dan zat ekstraktif lainnya merupakan beberapa komponennya. TKKS merupakan sumber bahan organik yang kaya unsur hara N, P, K, dan Mg yang dapat digunakan sebagai bahan substitusi pupuk pada perkebunan kelapa sawit (Fatyasari dkk, 2022). Kandungan utama TKKS adalah selulosa dan lignin selain itu juga mengandung unsur organik (dalam sampel kering): 42,8% C; 0,80% N; 0,22% P₂O₅; 0,30% MgO; 0,09% K₂O. Tandan kosong kelapa sawit memiliki komposisi kimia berupa selulosa 45,95%, hemiselulosa 22,84%, lignin 16,49%, minyak 2,41%, dan abu 1,23%).

Aplikasi *biochar* tandan kosong kelapa sawit terbukti dapat memperbaiki sifat fisik tanah, seperti struktur tanah, daya simpan air, dan aerasi tanah. Hal ini dibuktikan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rauf *et al* (2020) bahwa pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan air tersedia (4,99%) lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian *biochar* pelepah kelapa sawit (4,14%).

Biochar tidak memiliki kemampuan untuk secara langsung menyediakan unsur hara, sehingga perlu dikombinasikan dengan pupuk lainnya, salah satunya dengan pupuk hayati berbentuk cair. Penambahan pupuk hayati cair atau pupuk organik cair kaya bakteri dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman (Nafi'ah *et al.*, 2021). Pengaplikasian pupuk hayati pada tanaman merupakan salah satu alternatif atau solusi untuk memperbaiki sifat biologis tanah, karena sifat tidak merusak dan tidak mencemari lingkungan (Fauziah *et al.*, 2023). Salah satu pupuk organik cair yang dapat digunakan adalah pemanfaatan produk mikrobat yang diperkaya dengan konsorsium bakteri *Azotobacter* sp, *Streptomyces* sp, *Pseudomonas* sp, *Lactobacillus* sp dan *Paenibacillus poymyxa*. Biochar lebih efektif jika dikombinasikan dengan bahan pembenah organik seperti kompos, pupuk kandang, pupuk anorganik, dan pupuk hayati (Ikraman *et al.*, 2022).

Limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) merupakan limbah yang paling banyak dihasilkan dari tandan segar buah kelapa sawit. LCPKS ini lebih dikenal dengan nama POME (*Palm Oil Mill Effluent*) memiliki potensi sebagai pupuk organik cair karena mengandung nutrisi yang sangat dibutuhkan oleh tanaman (Elfidiyah & Roni, 2019; Hau dkk., 2020).. Berbagai solusi telah diusulkan untuk mengurangi dampak negatif POME, meliputi konversi POME menjadi bio-slurry, pemanfaatannya untuk produksi biogas, dan pengolahannya menjadi produk bernilai tambah berupa pupuk organik cair (POC) dengan menggunakan metode fermentasi. Metode fermentasi telah terbukti mampu menghilangkan bau tak sedap yang terkait dengan POME dan menghasilkan aroma tapai yang diinginkan (Tsania *et al.*, 2021). Pemanfaatan biomassa pertanian sebagai pupuk telah mendapatkan perhatian yang cukup besar melalui modifikasi bahan baku, penggunaan metode fermentasi aerobik dan anaerobik, serta pemilihan mikroorganisme pengurai yang sesuai untuk mencapai karakteristik pupuk yang optimal (Siahaan *et al.*, 2021).

Menurut Steven Rizki Clario dan Sakiah Sakiah (2025), kandungan bahan organik yang terkandung dalam limbah hasil pengolahan kelapa sawit merupakan bahan baku potensial yang bernilai ekonomis dan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan produksi tanaman. POME segar kelapa sawit terdiri dari air 94- 95 %, larutan minyak 0,7-1,0 %, bahan padat total 4 - 5 %, dan padatan melayang 2 - 4 %. Bila kadar BOD kurang dari 5000 mg/l tersedia hara Nitrogen 55 kg, Fosfat 9 kg, Kalium 85 kg, serta Magnesium 18 kg dalam 100 Ton Palm Oil Mill Effluent (Maulana *et al.*, 2025). Pemanfaatan POME sebagai sumber pupuk di areal perkebunan juga sudah banyak dilakukan, seperti Stefani *et al.*, (2025) pemberian POME mampu menaikkan KTK tanah sehingga P yang berasal dari pupuk maupun P tanah yang tidak tersedia dapat menjadi tersedia.

Berdasarkan uraian di atas, maka ditinjau perlu dilakukan penelitian ini dengan memanfaatkan tandan kosong dalam bentuk biochar dan fermentasi limbah cair sebagai solusi dalam pemanfaatan limbah secara ekonomis yang sekaligus langkah tersebut merupakan upaya untuk mengurangi dampak negatif demi mewujudkan industri yang berwawasan lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana pengaruh interaksi biochar tandan kosong kelapa sawit dengan fermentasi limbah cair terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit
- Bagaimana pengaruh biochar tandan kosong kelapa sawit terhadap perbaikan sifat tanah untuk pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.
- Bagaimana pengaruh fermentasi limbah cair pabrik kelapa sawit terhadap ketersediaan hara untuk pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.

1.3 Tujuan Penelitian

- Menganalisis pengaruh Biochar tandan kosong kelapa sawit sebagai hasil dekomposer terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.
- Menganalisis pengaruh interaksi biochar tandan kosong kelapa sawit dengan fermentasi limbah cair terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.
- Menganalisis tingkat ketersediaan hara tanaman kelapa sawit pada pemberian biochar tandan kosong kelapa sawit dengan hasil fermentasi limbah cair.

- d. Menganalisis pengaruh fermentasi limbah cair kelapa sawit terhadap ketersediaan hara untuk pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.

1.4 Kegunaan Penelitian

- a. Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit dan limbah cair sebagai sumber nutrisi bagi tanaman.
- b. Diharapkan dapat memperbaiki ekosistem lahan pertanaman khususnya pada tanaman kelapa sawit.
- c. Sebagai bahan informasi serta pembandingan dalam penelitian perbaikan dampak ekosistem lahan pertanaman kelapa sawit serta sebagai saran teknologi dan industri untuk pemanfaatan limbah kelapa sawit.

1.5 Ruang lingkup Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara bertahap yang terdiri dari 3 tahap di mana satu sama lainnya saling terkait. Secara terperinci tahapan penelitian sebagai berikut :

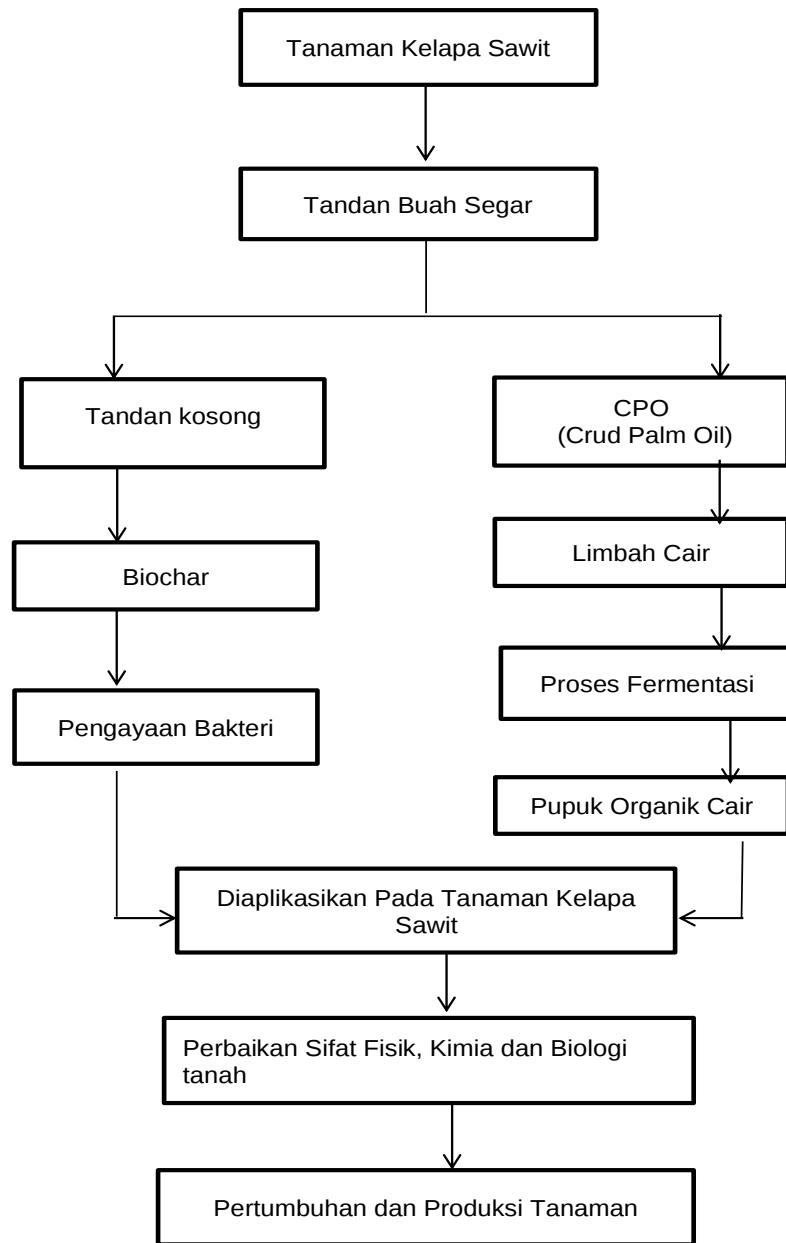
- a. Tahap I (Pengayaan Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan menggunakan Bakteri Actinomycetes). Pada tahapan ini dilaksanakan pada laboratorium dengan menggunakan 3 taraf kerapatan yaitu kerapatan bakteri 10^4 (k1), kerapatan bakteri 10^8 (k2) dan kerapatan bakteri 10^{12} (k3) dengan 3 kelompok.
- b. Tahap II (Pembuatan Biochar Tandan Kosong Kelapa sawit (TKKS) dan Fermentasi Limbah Cair Tanaman Kelapa Sawit/POME). Pada tahap ini pembuatan Biochar dengan alat pembakaran Pirolisator dan limbah cair kelapa sawit/POME dari kolam 3 instalasi kolam limbah Pabrik Kelapa Sawit.
- c. Tahap III (Aplikasi biochar tandan kosong kelapa sawit dengan pengayaan bakteri Actinomycetes hasil tahap pertama dan limbah cair pabrik kelapa sawit pada tanaman kelapa sawit TM Muda). Tahap ini dilakukan pada kebun kelapa sawit dengan berbagai dosis biochar dan aplikasi limbah cair dengan interval waktu yang berbeda.

1.6 Kebaruan Penelitian

- a. Modifikasi Mikroba Bakteri Actinomycetes untuk Pengayaan Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Fermentasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan penambahan Enzim
- b. Pengelolaan Limbah Perkebunan Kelapa Sawit dapat menekan dampak negatif dari limbah dan recycling hara dalam Perkebunan Tanaman Kelapa Sawit.

1.7 Kerangka Konseptual Penelitian

Gambar 1.1. Kerangka Konseptual Penelitian



BAB II

PENGAYAAN BIOCHAR TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS) DENGAN BAKTERI ACTINOMYCETES

Abstrak

Biochar adalah bahan padat (berupa arang) yang kaya akan karbon hasil konversi dari limbah organik (bomassa pertanian) melalui proses pembakaran tidak sempurna dengan suplay oksigen terbatas pada suhu tinggi yang sulit terdekomposisi melalui proses pirolisis. Biochar merupakan pembawa yang efektif bagi inokulan bakteri actinomycetes karena sifatnya yang menguntungkan untuk mendukung kehidupan mikroba. Penelitian ini untuk mempelajari pengayaan biochar dengan bakteri actinomycetes pada tiga tingkat kerapatan (10^4 ; 10^8 ; dan 10^{12} cfu/g) dengan kombinasi pengenceran 10^{-5} ; 10^{-6} dan 10^{-7} , dilaksanakan di Laboratorium Bioteknologi Tanaman, Pusat kegiatan Penelitian (PKP) Universitas Hasanuddin dari bulan Juli 2024 – Oktober 2024. Penelitian ini dilaksanakan dalam bentuk percobaan Rancangan Acak Kelompok (RAK) untuk 9 perlakuan dengan 3 ulangan. Pengayaan Biochar dengan menggunakan Bakteri Actinomycetes terdiri dari Kerapatan Bakteri 10^4 , Kerapatan Bakteri 10^8 dan Kerapatan Bakteri 10^{12} yang dikombinasikan dengan Pengenceran 10^{-5} , Pengenceran 10^{-6} dan Pengenceran 10^{-7} . Pengamatan parameter dilakukan secara periodik mingguan selama 4 minggu. Secara visual semua isolat umumnya memperlihatkan morfologi actinomycetes yang sama, pada umumnya bulat dengan elevasi timbul dan cembung, tepian rata dan tidak beraturan serta permukaan yang licin dan kasar/keriput tumbuh tinggi diatas permukaan medium. Rata-rata jumlah koloni tertinggi pada kondisi pH 7,93 dengan Suhu 24,8 °C serta nilai kelembapan 66. Analisis sidik ragam dan uji BNJ α 0,05 rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar terjadi pada minggu 1 setelah inokulasi pada kombinasi perlakuan Kerapatan Bakteri 10^8 dengan pengenceran 10^{-7} (k2p3) yaitu $4,5 \times 10^9$ cfu/g yang berbeda nyata dengan perlakuan lainnya.

Kata kunci: Arang, pirolisis, limbah organik, *Actinomycetes*

2.1 Pendahuluan

Pertanian berkelanjutan saat ini sangat penting untuk memenuhi kebutuhan pertanian jangka panjang dengan menggunakan sumberdaya alam tanpa merusak lingkungan. Saat ini sumberdaya lahan terus mengalami degradasi yang ditandai dengan hilangnya kesuburan tanah akibat pemakaian pupuk anorganik yang berlebihan, permukaan air tanah hilang secara cepat akibat eksploitasi berlebihan, salinitas tanah meningkat akibat drainase yang buruk, peningkatan residu bahan kimia di dalam air tanah dan hilangnya keanekaragaman hayati oleh sistem monocropping dalam rentang waktu yang lama (Stepa, 2022).

Biochar merupakan salah satu bahan alami alternatif pembenah tanah yang terbentuk melalui proses pembakaran biomassa/bahan organik dalam kondisi oksigen terbatas ataupun tanpa oksigen sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanah sebagai sumber bahan organik, biochar sangat efektif mampu bertahan selama ratusan hingga ribuan tahun bila dicampur ke dalam tanah. Biochar memiliki sifat yang stabil terhadap dekomposisi, bersifat alkali, memiliki tekstur berpori, halus, mampu menyerap substansi, serta mengandung unsur hara penting, terutama Fosfor (P) dan Kalium (K). Dalam jangka panjang, penggunaan biochar memiliki dampak yang efektif dalam meningkatkan kualitas tanah (Widowati et al., 2020).

Penggunaan bahan organik dalam bentuk biochar merupakan salah satu strategi dalam manajemen lingkungan pertanian. Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar mampu memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah sehingga dapat mendukung pertumbuhan tanaman (Evizal & Prasmatiwati, 2023). Biochar dapat meningkatkan kualitas tanah secara signifikan, seperti kapasitas menahan air, stabilitas agregat tanah dan retensi hara (Domingues et al., 2017; Rawat et al., 2019). Biochar dengan pH basa serta kandungan N, P dan K yang cukup dapat berfungsi nganda sebagai pembenah tanah dan sumber hara (Hasibuan et al., 2023).

Peluang pemanfaatan biochar sangat besar mengingat potensi bahan baku biochar limbah pertanian cukup tersedia terutama yang sulit terdekomposisi atau dengan rasio C/N tinggi. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) punya potensi besar sebagai bahan baku biochar. Di Indonesia, limbah pertanian seperti tandan kosong dan cangkang kelapa sawit serta tongkol jagung belum dimanfaatkan secara maksimal sebagai sumber bahan organik (Lubis et al., 2023). Biomassa ini terus dihasilkan dalam jumlah yang cukup besar. Indonesia memiliki luas perkebunan kelapa sawit terbesar di Asia, yakni 16,38 juta hektar dengan total produksi CPO sebesar 50,07 juta ton/tahun (BPS, 2024). Dari produksi tersebut, 90% dalam bentuk limbah (Melani et al., 2025, 2015)]. Ada 45,06 juta ton limbah yang berpotensi sebagai sumber bahan organik, 23% dari tandan kosong kelapa sawit dan 5,5 % cangkang kelapa sawit (Hidayat et al., 2022).

Pupuk organik yang mengandung mikroba menjadi satu solusi yang baik dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan. Pupuk organik yang diperkaya dengan mikroba mampu mengurai senyawa organik di dalam tanah menjadi senyawa yang lebih sederhana dan membentuk senyawa lain. Fungsi lain dari pupuk organik adalah sebagai pembenah tanah, yaitu merubah kondisi fisik tanah menjadi agregat yang stabil dan banyak lagi fungsi lain dari pupuk organik yang sangat bermanfaat bagi tanah sendiri (Simarmata et al., 2021). Pupuk mikroba juga dapat meningkatkan proses dekomposisi bahan organik dalam tanah dan meningkatkan ketersediaan nutrisi (O'Callaghan et al., 2022).

Biochar menjadi pembawa yang cukup efektif untuk inokulan mikroba karena sifatnya yang sangat mendukung kehidupan mikroba, khususnya dalam aplikasi pertanian dan lingkungan. Biochar kaya akan bahan organik, nitrogen, fosfor dan kalium sebagai nutrisi, serta memiliki porositas dan kemampuan menahan air yang tinggi. Dengan porositas dan luas permukaan spesifiknya yang tinggi, biochar menyediakan ruang bagi kehidupan mikroorganisme (Zhang et al., 2022). Besarnya jumlah gugus fungsional hidroksil, karboksil, asam sulfonat, amino dan asilamino hidroksil serta karboksil cukup efektif untuk proses adhesi dan proliferasi sel mikroba juga meningkatkan persistensi mikroba. Sifat fisiokimia biochar yang baik memungkinkan imobilisasi bakteri pada permukaannya, sehingga dapat menghilangkan kontaminasi organik (Wu et al., 2022).

Mikroorganisme tanah memiliki peran penting dalam menjaga kesehatan dan produktivitas tanah dalam menunjang peningkatan produksi pertanian secara berkelanjutan karena peran kemampuannya untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan terhadap stress biotik dan abiotik, memulihkan kontaminasi pada tanah, mendaur ulang nutrisi, mengelolah kesuburan tanah dan mineralisasi batuan serta kemampuan lain dalam pengendalian Hama dan Penyakit (Ortiz & Sansinenea, 2022). Pemberian *Actinomyces* sp, memberikan manfaat penting dalam siklus nutrisi karena berperan sebagai pelarut fosfat yang menguntungkan bagi tanaman dan sebagai stimulator pertumbuhan tanaman serta menjadi pengurai di dalam tanah sehingga dapat memperbaiki sifat tanah (Amalia, 2021). Hasil penelitian Fitriana (2021), melaporkan bahwa bakteri *Actinomyces* karena mengeluarkan berbagai macam asam organik seperti asam format, asetat, spp. merupakan salah satu bakteri pelarut fosfat yang bersifat menguntungkan propional, dan lain-lain.

Kehadiran mikroorganisme di dalam dan permukaan tanah berupa bakteri, jamur, protozoa dan nematoda

akan mempengaruhi kemampuan tanaman untuk memperoleh nutrisi makro dan mikro yang berpengaruh baik pada pertumbuhan tanaman. Biochar merangsang terbentuknya ekosistem baru membentuk simbiosis mutualisme antara mikroorganisme dengan akar tanaman yang jangkauannya semakin melebar untuk mendapatkan nutrisi dan air yang dibutuhkan untuk pertumbuhan (Jin et al., 2024). Asosiasi simbiosis biochar dan akar tanaman meningkatkan aktivitas *arbuscular mycorrhizal fungi* (AMF) meningkatkan akumulasi P oleh tanaman dalam tanah sebagai hasil dari aplikasi biochar (Asfaw et al., 2019).

Bakteri actinomycetes adalah salah satu mikroba yang banyak ditemukan membentuk simbiosis mutualisme dengan sistem perakaran tanaman (Harahap et al., 2022). Ada beberapa jenis bakteri actinomycetes dapat menghasilkan PGP (*Plant Growth Promoting*) pada sistem perakaran yang mendukung pertumbuhan tanaman dan kemampuan dalam melarutkan fosfat (Zayed et al., 2023) serta kemampuan menghasilkan siderofor (Karthikeyan et al. 2018). Actinomycetes memiliki peran penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan produksi senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi tanaman yang terdistribusi secara luas diseluruh ekosistem tanah, memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi ekstrim dan berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman terutama di daerah rhizosfer (Kurniafebi, 2021).

Pemberian Bakteri actinomycetes dapat membantu nutrisi dalam tanah yang tidak terlarut. Meningkatnya pertumbuhan vegetatif tanaman karena kemampuan bakteri Actinomycetes dalam melarutkan fosfat yang dibutuhkan oleh tanaman yang berperan penting sebagai pendukung pupuk hayati (Adelia, 2022). Bakteri Actinomycetes juga dapat meningkatkan penyerapan nutrisi dengan mensekresi organik asam untuk melarutkan mineral dan mengaktifkan nutrisi di dalam tanah, yang mengarah kesirkulasi dan pemanfaatan nutrisi di dalam tanah. Jumlah dan jenis Actinomycetes yang terdapat dalam tanah sangat bervariasi, hal ini dipengaruhi oleh karakteristik tanah seperti suhu, jenis tanah, pH tanah, kandungan bahan organik, aerasi dan kadar air (Lidiani dan Ardiningsi, 2019).

Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar merupakan pembawa yang efektif bagi inokulan mikroba actinomycetes karena sifatnya yang kaya akan karbon organik, mengandung nitrogen, fosfor dan kalium sebagai nutrisi yang mendukung kehidupan mikroba dalam aplikasi pertanian dan lingkungan.

2.2 Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit

Industri pengolahan kelapa sawit menghasilkan limbah padat Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang memiliki potensi secara ekonomi sebagai alternatif pupuk organik (Muhammad) et al., 2024). Jumlah TKKS ini cukup besar karena hampir sama dengan jumlah produksi minyak sawit mentah. Tandan kosong kelapa sawit mengandung serat yang tinggi. Kandungan utama TKKS adalah selulosa dan lignin selain itu juga mengandung unsur organik (dalam sampel kering): 42,8% C; 0,80% N; 0,22% P₂O₅; 0,30% MgO; 0,09% K₂O. Tandan kosong kelapa sawit memiliki komposisi kimia berupa selulosa 23,7-65,0%, hemiselulosa 20,6-33,5%, lignin 14,1-30,45%, minyak 2,41%, dan abu 1,23% (Joni et al., 2019).

Tandan kosong kelapa sawit mengandung sejumlah material penting yang dapat dimanfaatkan dan diolah menjadi material lain dengan nilai ekonomis yang lebih tinggi (Wicakso et al, 2021). Jika dibandingkan dengan bahan penyubur tanah lainnya, TKKS merupakan salah satu pupuk organik yang mengandung Kalium (K) cukup tinggi selain kandungan Nitrogen (N), fosfor (P) dan Mg juga berpotensi untuk menurunkan degradasi hidrokarbon karena memiliki konsentrasi nitrat, fosfat dan kalium yang baik (Fatysari et al, 2022). Selain digunakan sebagai pupuk organik, TKKS juga dapat diolah menjadi biochar. Biochar merupakan material tangguh yang dihasilkan dari biomassa melalui proses konversi termokimia (pirolisis) dalam kondisi suhu tinggi dengan oksigen terbatas atau tanpa oksigen sama sekali, menghasilkan produk kaya C dengan sifat fisik dan kimia yang stabil (Wang et al., 2020c; Ravindiran dkk., 2024).

Penggunaan bahan organik dalam bentuk biochar merupakan salah satu strategi dalam manajemen lingkungan pertanian. Menurut Handani (2017) bahwa aplikasi biochar TKKS mampu meningkatkan sifat-sifat kimia tanah karena kandungan C-Organik, N-Total, P-tersedia, k-dd, KTK, NH₄⁺ dan NO₃⁻ serta kandungan hara tanaman N,P,dan K.). Sesuai hasil penelitian Sukmawati (2020), hasil sifat kimia pada biochar tandan kosong kelapa sawit menunjukkan pH = 7,2, KTK = 52,36 cmol/g. C-organik = 59,84 %, N- Total= 1,08 %, C/N=55,42 %. Biochar dapat meningkatkan kualitas tanah secara signifikan, seperti kapasitas menahan air, stabilitas agregat tanah dan retensi hara (Yadav et al., 2023; Tian et al 2024; Singh et al., 2022; Li et al 2023; Rahim et al., 2024). Biochar juga dapat meningkatkan retensi air (Holatko et al., 2022a; Hasanuzzaman et al., 2024) serta meningkatkan kandungan C-organik dan fosfat (Ravindiran et al., 2024; Mahala et al., 2020).

Aplikasi biochar tandan kosong kelapa sawit terbukti dapat memperbaiki sifat fisik tanah, seperti mendorong pembentukan agregat tanah, meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air dan hara, serta mengurangi pencucian hara (Alkharabsheh et al., 2021). Hal ini dibuktikan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rauf et al (2020) bahwa pemanfaatan biochar tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan air tersedia (4,99%) lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian biochar pelepah kelapa sawit (4,14%). Selain itu biochar dapat memperbaiki sifat biologi tanah

dengan menyediakan C dan N vital bagi mikroorganisme, yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas mereka dengan menyediakan lingkungan yang sesuai bagi komunitas mikroba tanah (Dai et al., 2021; Jin et al., 2024).

Penggunaan biochar sebagai pembawa inokulum mikroba telah terbukti meningkatkan persistensi kelangsungan hidup dan kolonisasi mikroba yang diinokulasi di tanah dan akar tanaman yang memainkan peran penting dalam proses biokimia tanah, siklus nutrisi dan karbon dan pemulihan kontaminasi tanah (Tu et al., 2020; Lu et al., 2020; Chen et al., 2022). Biochar yang diperkaya dapat berfungsi sebagai sumber nutrisi dan pembawa mikroba untuk aplikasi tanah karena sifatnya yang berpori, yang dapat meningkatkan kapasitas pembawa nutrisi dan mikroba (Ajeng et al., 2020; Khadem et al., 2021).

Struktur berpori biochar, luar permukaan internalnya yang tinggi dan kemampuannya untuk menyerap bahan organik terlarut, gas dan nutrisi anorganik cenderung menyediakan habitat yang sangat sesuai bagi mikroba untuk berkolonisasi, tumbuh dan memproduksi, terutama untuk bakteri aktinomycetes dan jamur mikoriza arbuskula (Zhang et al., 2022). Kehadiran dan distribusi ukuran pori-pori dalam biochar menyediakan habitat yang cocok untuk mikroorganisme dengan melindunginya dari pemangsaan dan kekeringan dengan menyediakan banyak kebutuhan karbon (C), energi dan nutrisi mineral yang beragam (Shaheen et al., 2019; Li et al., 2019a; Husain et al., 2021). Asosiasi simbiosis biochar dan akar tanaman meningkatkan aktivitas arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) meningkatkan akumulasi P oleh tanaman dalam tanah sebagai hasil dari aplikasi biochar (Asfaw et al., 2019).

Penggunaan biochar tandan kosong kelapa sawit yang diperkaya dengan bakteri *Actinomyces* spp. diharapkan dapat menjadi alternatif peningkatan kandungan bahan organik dalam tanah sehingga dapat memperbaiki keadaan biologis tanah.

2.3 Bakteri *Actinomyces* dan Peranannya

Mikroorganisme tanah adalah kelompok biota yang mungkin paling melimpah dan beragam termasuk bakteri, fungi, aktinomycetes, arkea dan protozoa memiliki peranan yang sangat krusial dalam fungsi ekosistem tanah (Febriana, 2024). Mikroorganisme memiliki peran potensial yang dapat dimaksimalkan dalam produksi pertanian berkelanjutan karena kemampuannya untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik, mendaur ulang nutrisi, mengelola keseimbangan bahan organik tanah dan siklus hara serta kemampuan lain dalam efisiensi penggunaan jumlah pupuk atau pestisida di bidang pertanian (Rashid et al., 2019; Coonan et al., 2020).

Salah satu mikroorganisme yang dapat berikatan dengan akar tanaman yaitu aktinomycetes. Aktinomycetes adalah perantara antara bakteri dan fungi menghasilkan zat antimikroba dan berperan penting pada proses perombakan bahan organik kompleks menjadi bahan organik yang lebih sederhana dan pembentukan agregat. (Gul dan Walen., 2022; Oyedo et al., 2023). Bakteri Aktinomycetes merupakan kelompok bakteri yang tergolong dalam ordo Actinomycetales yang terdiri dari empat family, yaitu *Mycobacteriaceae*, *Actinomycetaceae*, *Streptomyetaceae* dan *Actinoplanaceae*. Bakteri aktinomycetes adalah sekelompok besar bakteri gram positif aerobik dengan persentase GC tinggi yang membentuk filamen atau hifa bercabang dan spora aseksual. Bakteri ini sangat mirip dengan jamur secara keseluruhan morfologinya (Siro dan Pipite, 2024). Aktinomycetes juga disebut dengan nama filamentous bacteria karena morfologinya mirip dengan cendawan berfilamen karena membentuk miselium dan spora, tetapi komposisi dinding sel dan struktur selnya lebih mirip bakteri (Putri et al., 2018).

Sebagian besar aktinomycetes, terutama streptomycetes adalah saprofit penghuni tanah yang berkembang biak selama siklus hidupnya sebagai spora semidorman, terutama dalam kondisi nutrisi yang terbatas dan kemudian beradaptasi dan dapat hidup pada berbagai lingkungan yang lebih luas. Saat ini aktinomycetes dapat ditemukan di tanah, air tawar, air asin juga pada udara. Aktinomycetes dapat ditemukan dalam kondisi yang berlimpah pada tanah, terutama pada tanah dengan kandungan bahan organik tinggi terutama di bagian permukaan tanah rizhosfer (Tleuova et al., 2024).

Populasi aktinomycetes lebih tinggi dapat ditemukan pada daerah rizhosper dibandingkan pada tanah non-rizhosfer disebabkan oleh sedimen rizhosper merupakan habitat yang mendukung pertumbuhan mikroba pada kondisi aerob yang tersedia oleh sistem perakaran yang kaya akan senyawa organik sebagai produk eksudat sebagai nutrisi mikroba untuk tumbuh seperti asam amino dan gula (Wahyuni et al., 2024). Eksudat ini tidak hanya menyediakan nutrisi bagi mikroorganisme, tetapi juga mendorong perkembangan simbiosis antara aktinomycetes dengan akar tanaman, yang membantu dalam pelarutan fosfat dan produksi hormon pertumbuhan seperti *Indole Acetic Acid* (Kurniafebi, 2021; Fitriana, 2021; Kusrachdiyanti et al., 2020).

Aktinomycetes memiliki keistimewaan yaitu cenderung berasosiasi dengan suatu lapisan permukaan padat. Aktinomycetes berperan dalam dekomposisi dan siklus nutrisi berbagai bahan organik kompleks di tanah seperti lignin dan selulosa, karbon, nitrogen dan fosfor untuk kesuburan tanah dan nutrisi penting bagi tanaman, menghasilkan berbagai senyawa bioaktif, termasuk antibiotik, enzim dan hormon pertumbuhan tanaman yang penting dalam aplikasi di bidang pertanian dan industri farmasi, serta menghasilkan senyawa antibakteri dan anti jamur yang

dapat menghambat pertumbuhan patogen tanaman, sehingga berpotensi sebagai agen pengendali hayati (Khalel et al., 2020; Ngamcharungchit et al., 2023). Mereka memainkan peran penting dalam ekosistem tanah, terutama dalam proses dekomposisi bahan organik dan kesuburan tanah (Venkateswarulu, T. C et al., 2018). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sahur et al., (2018), menunjukkan bahwa mikroba Actinomycetes mampu meningkatkan pertumbuhan dan nutrisi tanaman serta menguntungkan kolonisasi akar kedelai. Inokulasi dengan kedua jenis mikroorganisme tersebut menunjukkan efek sinergis terhadap parameter peningkatan pertumbuhan tanaman dan perolehan hara.

2.4 Bahan dan Metode Penelitian

2.4.1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bioteknologi Tanaman, Pusat kegiatan Penelitian (PKP) Universitas Hasanuddin dan berlangsung dari bulan Juli 2024 – Oktober 2024.

2.4.2. Alat dan Bahan

Alat digunakan adalah; Pirolisator, Mikroskop, Infrared Thermometer (MESTEK), pH meter alat pencacah (pisau/parang), timbangan digital, cawan petridisk, spatula, laminar air flow (LAF), inkubator (Mettler), autoklaf (All American), kompor listrik (Maspion), timbangan analitik (Radwag), botol Duran, cawan petri (Pyrex), beaker glass (Pyrex), pipet volume 1 ml (Pyrex), erlenmeyer (Pyrex), tabung reaksi (Pyrex), spatula, ose, bunsen, pinset, dan pisau, kamera, dan alat tulis menulis lainnya. Sedangkan bahannya adalah media NA (Nutrient Agar), Biochar tandan kosong kelapa sawit (TKKS), Bakteri Actinomycetes, media NA (Nutrient Agar), medium SNB (Starch Nitrate Broth), air suling, etanol

2.4.3. Metode Penelitian

Pembuatan Media

Pertama siapkan 8 gram SNB (Starch Nitrate Broth) dengan menggunakan timbangan analitik. Kemudian, timbang 21 gram agar-agar. Masukkan 1000 ml air steril ke dalam botol Duran, lalu tambahkan SNB (Starch Nitrate Broth) dan agar-agar yang telah ditimbang ke dalam botol tersebut. Selanjutnya, panaskan campuran menggunakan hotplate sambil terus diaduk hingga media mendidih dan terlihat homogen (larut sempurna).

Masukkan media yang akan disterilkan ke dalam autoklaf. Pastikan autoklaf tertutup rapat dengan memutar dan mengunci semua kunci penutupnya. Kemudian nyalakan autoklaf. Perhatikan katup uap autoklaf, saat uap mulai keluar dari salah satu katup, segera tutup katup tersebut. Biarkan hingga suhu di dalam autoklaf mencapai 121 °C. Saat suhu mencapai 121 °C, atur timer selama 15 menit untuk proses sterilisasi. Setelah 15 menit berlalu, matikan autoklaf dan biarkan hingga suhu di dalam autoklaf turun sepenuhnya hingga mencapai suhu 0 °C sebelum membuka dan mengeluarkan media.

Tahap berikutnya sterilisasi semua alat dan bahan yang akan digunakan dalam laminar air flow dengan menyalakan lampu UV selama 30 menit, kemudian matikan lampu UV dan nyalakan blower selama 10 menit untuk menghilangkan sisa ozon. Selanjutnya masukkan media NA yang telah disterilisasi dan didinginkan ke dalam laminar air flow. Nyalakan bunsen dan lakukan sterilisasi pada pinggiran cawan petri sebelum menuangkan media NA sebanyak 15-20 mL ke dalam setiap cawan. Diamkan cawan-cawan tersebut hingga media memadat sepenuhnya lalu sterilisasi kembali pinggiran cawan petri menggunakan bunsen dan wrapping pada bagian tepi cawan petri agar tetap steril. Ulangi proses ini hingga semua media selesai dituangkan. Terakhir, simpan media NA dalam kondisi cawan terbalik untuk menghindari terbentuknya embun pada permukaan media.

Penggoresan Bakteri

Setelah tahap-tahap sterilisasi di dalam laminar air flow telah dilakukan. Masukkan isolat bakteri yang akan diperbanyak ke dalam laminar air flow. Nyalakan bunsen di dalam laminar air flow. Ambil jarum ose, lalu sterilkan dengan memanaskannya pada nyala api bunsen hingga membara. Setelah itu, dinginkan jarum ose sejenak. Selanjutnya dengan jarum ose yang sudah dingin, ambil satu koloni isolat bakteri dari kultur sebelumnya. Lakukan penggoresan pada permukaan media NA (Nutrient Agar) yang baru dengan jarum ose tersebut. Penggoresan dapat dilakukan dengan metode kuadran atau zigzag, sesuai kebutuhan. Setelah penggoresan selesai, wrapping rapat bagian tepi cawan petri untuk mencegah kontaminasi. Terakhir, lakukan inkubasi cawan petri yang telah diinokulasi bakteri selama 24-72 jam pada suhu yang sesuai untuk pertumbuhan bakteri.

Pengayaan Bakteri Pada Biochar

Media biochar yang akan diperkaya dengan bakteri actinomycetes dipastikan telah disterilisasi untuk menghindari kontaminasi mikroorganisme lain. Selanjutnya, bakteri actinomycetes yang telah diperbanyak secara murni, diinokulasikan ke dalam media biochar dengan cara pencampuran homogen menggunakan tehnik aseptik untuk memastikan distribusi bakteri yang merata pada permukaan dan pori-pori biochar.

Penelitian ini dilaksanakan dalam bentuk percobaan berdasarkan Rancangan Acak Kelompok (RAK) untuk 9 perlakuan dengan 3 ulangan. Pengayaan Biochar dengan menggunakan Bakteri Actinomycetes terdiri dari Kerapatan Bakteri 10^4 (k1), Kerapatan Bakteri 10^8 (k2) dan Kerapatan Bakteri 10^{12} (k3) dengan kombinasi Pengenceran 10^{-5} (p1), Pengenceran 10^{-6} (p2) dan Pengenceran 10^{-7} (p3). Terdapat 9 kombinasi perlakuan untuk masing masing ulangan. Inokulasi Bakteri actinomycetes dilakukan pada sampel Biochar tandan kosong kelapa sawit yang telah disterilkan dengan konsentrasi kerapatan bakteri 10^4 , Kerapatan Bakteri 10^8 dan Kerapatan Bakteri 10^{12} , kemudian di simpan pada inkubator. Sumber inokulum bakteri diisolasi 1 gram material biochar yang telah diisolasi selama seminggu dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang telah diisi dengan larutan air 9 ml untuk diencerkan secara berturut- turut hingga pengenceran 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} .

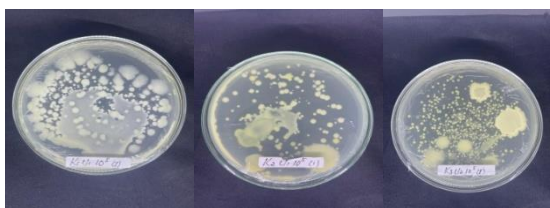
Dari masing-masing tabung tingkat pengenceran (pengenceran 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7}) diambil 0,1 ml suspensi bakteri lalu dipindahkan ke dalam cawan petri yang berisi medium padat NA (Nutrient Agar). Bakteri disebar merata pada seluruh permukaan media dengan menggunakan spatula. Bakteri diinkubasi dalam box inkubator selama 2-3 hari, kemudian dilakukan pengamatan dan perhitungan parameter dari koloni bakteri yang muncul. Proses yang sama dilakukan pada minggu ke 2, minggu ke 3 dan minggu ke 4 sejak isolasi bakteri dilakukan pada biochar. Pengamatan dan perhitungan parameter pH, suhu biochar, Kelembaban/kadar air dan total jumlah koloni bakteri aktinomycetes dilakukan secara berkala (minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu 4).

Jumlah koloni dinyatakan dalam Colony Forming Unit (cfu) dan dihitung dengan rumus: $cfu_{gr-1} = \text{jumlah koloni actinomycetes} \times 1/\text{faktor pengenceran}$ (Tyas et al., 2018).

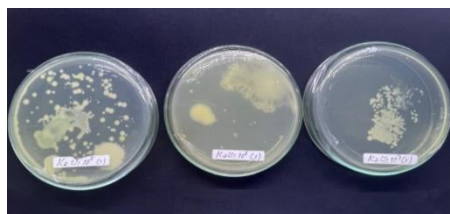
Data dikumpulkan kemudian di tabulasi dalam bentuk Tabel. Data kemudian diolah dalam bentuk sidik ragam (Anova). Data yang menunjukkan hasil yang nyata atau sangat nyata akan dilanjutkan dengan analisis beda dengan menggunakan uji beda nyata jujur (BNJ) .

2.5 Hasil dan Pembahasan

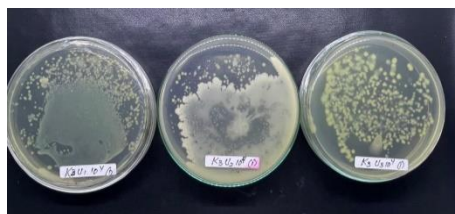
Isolat Bakteri Actinomycetes pada gambar (2.1), gambar (2.2), gambar (2.3) dan gambar (2.4) masing-masing sebanyak 9 cawan petri memperlihatkan morfologi dan koloni jumlah koloni pada minggu pertama, minggu kedua, minggu ke tiga hingga minggu ke empat. Dari hasil pengamatan isolat periode mingguan terlihat bahwa secara visual semua isolat umumnya memperlihatkan morfologi yang sama karena sumber inokulum yang sama. Hasil perhitungan rata-rata jumlah koloni terbesar 4.5×10^9 cfu/g terdapat pada isolat bakteri dengan kerapatan bakteri 10^8 dengan pengenceran 10^{-7} (k2p3) di minggu 1 setelah inokulasi, demikian juga terjadi pada isolat bakteri dengan perlakuan yang sama pada minggu 2, minggu 3 dan minggu ke 4.



K1 (Kerapatan Bakteri 10^4)

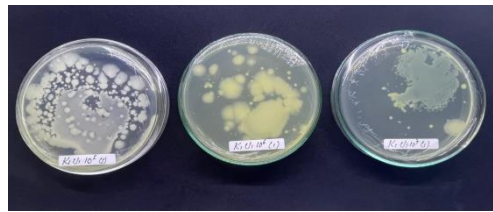


K2 (Kerapatan Bakteri 10^8)

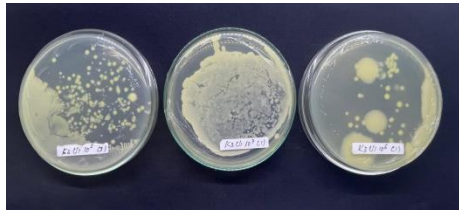


K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})

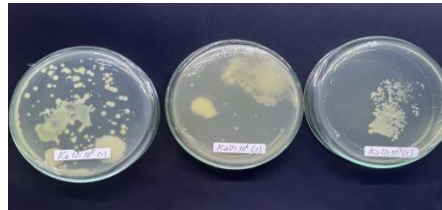
Gambar 2.1. Koloni isolat Bakteri Actinomycetes seminggu setelah inokulasi, K1 (Kerapatan Bakteri 10^4), K2 (Kerapatan Bakteri 10^8) dan K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12}).



K1 (Kerapatan Bakteri 10^4)

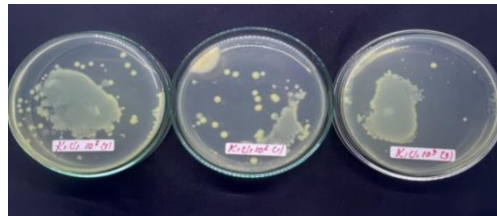


K2 (Kerapatan Bakteri 10^8)

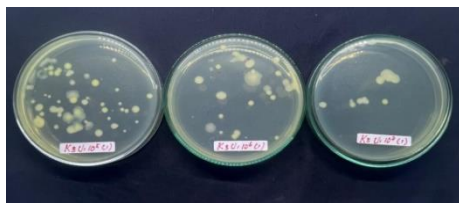


K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})

Gambar 2.2. Koloni isolat Bakteri Actinomycetes 2 minggu setelah inokulasi, K1 (Kerapatan Bakteri 10^4), K2 (Kerapatan Bakteri 10^8) dan K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})



(Kerapatan Bakteri 10^4)

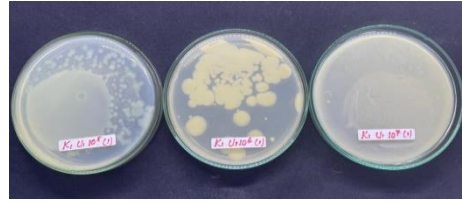


K2 (Kerapatan Bakteri 10^8)



K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})

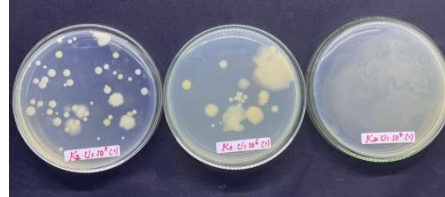
Gambar 2.3. Koloni isolat Bakteri Actinomycetes 3 minggu setelah inokulasi, K1 (Kerapatan Bakteri 10^4), K2 (Kerapatan Bakteri 10^8) dan K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12}).



K1 (Kerapatan Bakteri 10^4)



K2 (Kerapatan Bakteri 10^8)



K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})

Gambar 2.4. Koloni isolat Bakteri Actinomycetes 4 minggu setelah inokulasi, K1 (Kerapatan Bakteri 10^4), K2 (Kerapatan Bakteri 10^8) dan K3 (Kerapatan Bakteri 10^{12})

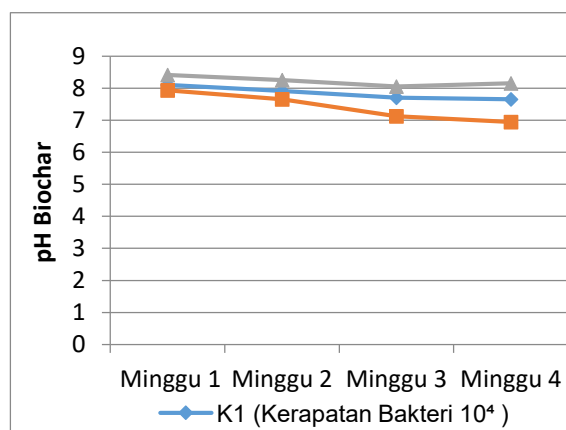
Terlihat pada isolat bentuk pada umumnya bulat dengan elevasi timbul dan cembung, tepian rata dan tidak beraturan serta permukaan yang licin dan kasar/keriput tumbuh tinggi diatas permukaan medium (Annisa et al., 2025). Actinomycetes bersifat uniseluler seperti bakteri dan tidak memiliki dinding sel yang berbeda, tetapi dapat menghasilkan miselium yang nonseptate dan lebih ramping. Koloni Actinomycetes biasanya keras, kasar, dan tumbuh tinggi diatas permukaan medium. Koloni Actinomycetes membentuk konsistensi mirip tepung dan menempel kuat pada permukaan agar-agar, menghasilkan hifa dan spora seperti jamur (Trinset et al., 2025).

Koloni Actinomycetes yang masih muda muncul perlahan tampak seperti bakteri pada umumnya yaitu permukaan bulat, dengan elevasi cembung dan timbul, tepian rata yang tidak beraturan serta permukaan koloni licin dan kasar, melekat kuat pada permukaan media agar (Gintoe et al., 2025). Bakteri ini termasuk gram positif yang memiliki bentuk sel seperti jamur karena sel berupa miselium yang bercabang-cabang membentuk percabangan monopodial dengan panjang berkisar antara 0,3– 4 μm . Miseliumnya merupakan hifa vegetatif yang tumbuh di permukaan dan melakukan penetrasi dan fragmentasi jika diisolasi dalam media agar (Matalauni et al., 2025).

Morfologi actinomycetes bervariasi dalam bentuk kokus dan batang hingga struktur multiseluler kompleks yang menyerupai miselium jamur berfilamen, seperti yang ada pada gambar isolat, di mana struktur miselium dapat berupa struktur udara atau melekat pada substrat (Patel et al., 2021; Wu et al., 2020). Karakteristik ini juga ditambah dengan fakta bahwa beberapa individu actinomycetes menghasilkan spora sebagai bentuk reproduksi aseksual yang menyebabkan actinomycetes dianggap sebagai mikroorganisme transisi antara bakteri dan fungi. Namun profil genetik dan seluler actinomycetes merupakan karakteristik dari atribut bakteri, seperti kromosom yang terbungkus dalam nukleoid prokariotik dan dinding sel yang terdiri dari peptidoglikan (Bergeijk et al., 2020; Barka et al., 2016).

Aktinomisetes terutama ditemukan di tanah, di mana mereka mewakili lebih dari 30% dari seluruh populasi mikroba dan dapat bervariasi dari 106 sampai 109 bakteri per gram (Tleuova et al., 2024). Untuk bertahan hidup di lingkungan ini, aktinomisetes mengembangkan mekanisme rumit terutama untuk penguraian bahan organik dengan menghasilkan enzim yang dapat memecahnya. komponen tanah dan memperoleh nutrisi yang dibutuhkan untuk bertahan hidup (Bawamenewi et al., 2025). Selulosa dan lignin, yang ditemukan dalam sisa-sisa biomassa, dan kitin yang ditemukan dalam rangka luar serangga, adalah beberapa substrat yang dapat dihidrolisis oleh enzim aktinomisetes (Salwan et al., 2018).

Periodik	Nilai pH		
	k1	k2	k3
Minggu 1	8,1	7,93	8,41



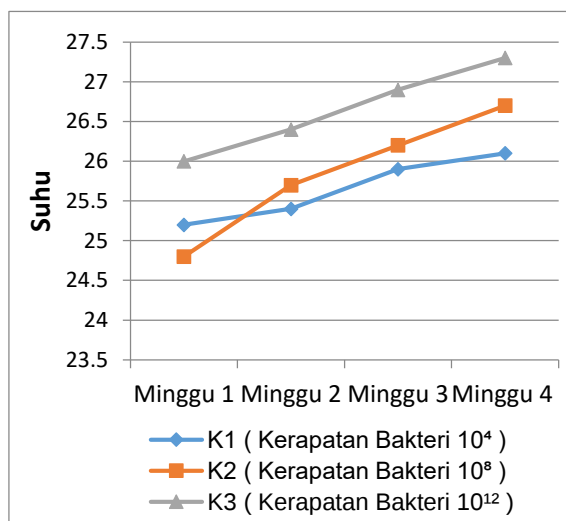
Minggu 2	7,91	7,65	8,25
Minggu 3	7,7	7,12	8,05
Minggu 4	7,65	6,94	8,15

Tabel 2.1. Tabel dan Grafik nilai pH biochar setelah inokulasi bakteri Actinomycetes dengan  k1 (kerapatan bakteri 10^4),  k2 (kerapatan bakteri 10^8) dan  k3 (Kerapatan Bakteri 10^{12}) pada minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu ke 4.

Tabel 2.1 dan grafik perubahan nilai pH pada biochar setelah inokulasi bakteri actinomycetes minggu pertama hingga minggu ke 4 menunjukkan pH biochar berada pada angka 6,94 hingga 8,41. Secara umum pH biochar mengalami penurunan pada semua perlakuan kerapatan bakteri dari minggu pertama hingga minggu ke 4, dengan pH terendah 6,94 terjadi pada biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^8 (k2) di minggu 4 setelah inokulasi sedangkan pH tertinggi 8,41 pada biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^{12} (K3) terjadi pada minggu 1. Jumlah koloni terbesar 4.5×10^9 cfu/gram terdapat pada isolat bakteri biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^8 (k2) dengan pengenceran 10^{-7} (p3) pada pH 7,93 di minggu 1 setelah inokulasi.

Mikroorganisme rentan terhadap variasi pH lingkungan, dan dalam kondisi lapangan, pH optimal untuk reproduksi dan viabilitasnya berkisar antara 6 hingga 8 (Zhang et al., 2022). Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu faktor lingkungan yang mempengaruhi aktivitas dan pertumbuhan bakteri, pH dapat mempengaruhi kerja enzim dan permeabilitas sel, yang kemudian akan berdampak pada metabolisme sekaligus terhadap pertumbuhan bakteri. Actinomycetes termasuk bakteri yang tidak tahan asam, berbentuk batang, gram positif, bersifat anaerobik atau anaerobik fakultatif (mampu tumbuh baik jika ada O_2 bebas atau tidak ada O_2). Actinomycetes tidak toleran terhadap asam dan jumlahnya akan menurun pada keadaan lingkungan dengan pH di bawah 5. Interaksi antara pH biochar dengan Perlakuan tingkat kerapatan bakteri akan mempengaruhi kepadatan Actinomycetes. Rentang derajat keasaman ideal untuk pertumbuhan Bakteri Actinomycetes berada pada kisaran pH antara 6,5 hingga 8,0. Pendapat lain menyatakan actinomycetes masih dapat ditemukan dilingkungan dengan pH lebih rendah cenderung masam, berkisar 5,1 hingga 5,2 namun dapat mempengaruhi penurunan kepadatan populasi Actinomycetes. (Wenyika et al., 2025; Susilo et al 2025).]. pH biochar sering kali netral hingga sedikit basa dan dapat memberikan beberapa kapasitas penyangga pH (Shi dkk., 2019), Penambahan Biochar yang kaya akan komponen basa (Ca, Mg, dan K) dapat berkontribusi untuk menetralkan keasaman tanah dan mengurangi kelarutan logam-logam beracun seperti aluminium dalam tanah.

Periodik	Suhu		
	k1	k2	k3
Minggu 1	25,2	24,8	26,0
Minggu 2	25,4	25,7	26,4
Minggu 3	25,9	26,2	26,9
Minggu 4	26,1	26,7	27,3

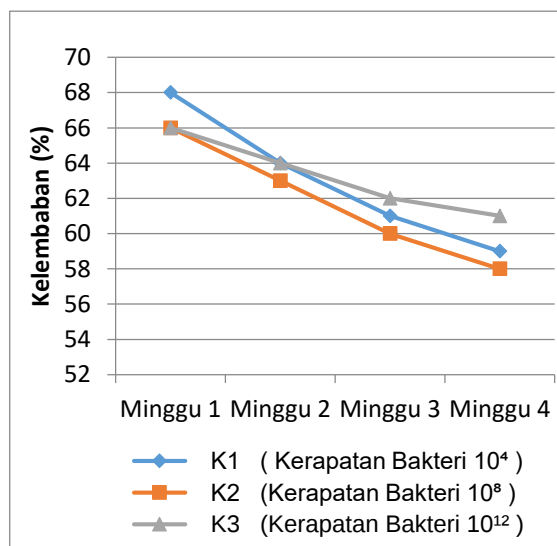


Tabel 2.2. Tabel dan Grafik nilai suhu biochar setelah inokulasi bakteri Actinomycetes dengan k1 (kerapatan bakteri 10^4), k2 (kerapatan bakteri 10^8) dan k3 (Kerapatan Bakteri 10^{12}) pada minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu ke 4.

Hasil pengamatan suhu biochar setelah inokulasi bakteri actinomycetes minggu pertama hingga minggu ke 4 pada Tabel 2.2, pada tabel dan grafik menunjukkan suhu terendah $24,8^{\circ}\text{C}$ terjadi pada biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^8 (k2) di minggu 1 setelah inokulasi sedangkan suhu tertinggi $27,3^{\circ}\text{C}$ pada biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^{12} (k3) terjadi pada minggu 4. Jumlah koloni terbesar $4,5 \times 10^9$ cfu/gram terdapat pada isolat bakteri biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^8 (k2) dengan pengenceran 10^{-7} (p3) pada suhu $24,8^{\circ}\text{C}$ yang terjadi pada minggu 1 setelah inokulasi.

Actinomycetes mempunyai sifat aerob, tumbuh lambat, membutuhkan temperatur yang cocok untuk pertumbuhan $25-37^{\circ}\text{C}$, berukuran besar dengan kecenderungan untuk membentuk rantau atau filament (Jakubiec-Krzesniak et al., 2018). Pertumbuhan optimum pada suhu antara $28 - 30^{\circ}\text{C}$. tetapi beberapa Actinomycetes khususnya genus Thermoactinomycetes dan Streptomyces masih dapat tumbuh dalam jumlah besar pada suhu $55 - 65^{\circ}\text{C}$ (Sofariyanti et al., 2019). Kondisi di mana air tergenang tidak cocok untuk pertumbuhan Actinomycetes, sedangkan kondisi kering atau setengah kering dapat mempertahankan populasi dalam jumlah besar.

Periodik	Kelembaban (%)		
	k1	k2	k3
Minggu 1	68	66	66
Minggu 2	64	63	64
Minggu 3	61	60	62
Minggu 4	59	58	61



Tabel 2.3. Tabel dan Grafik nilai kelembaban biochar setelah inokulasi bakteri Actinomycetes dengan k1 (kerapatan bakteri 10^4), k2 (kerapatan bakteri 10^8) dan k3 (Kerapatan Bakteri 10^{12}) pada minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu ke 4.

Data hasil pengamatan kelembaban biochar setelah inokulasi Bakteri Actinomycetes, Minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu 4 pada Tabel 2.3, pada tabel dan grafik terlihat bahwa kelembaban pada biochar terus mengalami penurunan dari minggu pertama hingga minggu ke empat. Penurunan nilai kelembaban biochar terjadi pada semua perlakuan kerapatan jumlah bakteri pada Kerapatan Bakteri 10^4 (k1), penurunan kelembaban biochar dari 68% pada biochar dari 68% pada minggu ke pertama hingga 59% pada minggu ke empat, juga penurunan kelembaban biochar dari 66% pada minggu pertama hingga 58% di minggu ke empat pada perlakuan Kerapatan Bakteri 10^8 (k2) serta kelembaban biochar 66% di minggu pertama hingga 61% di minggu ke empat 4 pada Kerapatan Bakteri 10^{12} (k3). Penurunan kelembaban biochar hingga minggu ke empat berjalan lambat seiring peningkatan nilai suhu pada masing-masing perlakuan kerapatan bakteri. Jumlah koloni terbesar $4,5 \times 10^9$ cfu/gram terdapat pada isolat bakteri biochar dengan perlakuan kerapatan bakteri 10^8 dengan pengenceran 10^{-7} (k2p3) pada kelembaban 66% yang terjadi pada minggu 1 setelah inokulasi.

Kelembaban yang sesuai untuk pertumbuhan Actinomycetes adalah 85%, bila kondisi tanah kering akan membentuk konidium. sifat biochar yang mampu merentensi air (tertahan di antara koloid biochar) mampu mempertahankan kelembaban dengan baik. Biochar dapat meningkatkan kualitas tanah secara signifikan, seperti

kapasitas menahan air, stabilitas agregat tanah dan retensi hara (Yadav et al., 2023; Tian et al 2024; Singh et al., 2022; Li et al 2023; Rahim et al., 2024). Biochar juga dapat meningkatkan retensi air (Holatko et al., 2022a; Hasanuzzaman et al., 2024), serta meningkatkan kandungan C-organik dan fosfat (Ravindiran et al., 2024; Mahala et al., 2020). Terjadi peningkatan water holding capacity (WHC) pada tanah pasir berlempung setelah diberi biochar, bahwa semakin tinggi proporsi biochar maka kemampuan tanah memegang air semakin tinggi (Tian et al., 2024).

Tabel 2.4. Data Hasil Pengamatan Rata-rata Jumlah Koloni Bakteri Actinomycetes pada Minggu 1, Minggu 2, Minggu 3 dan Minggu 4 setelah inokulasi.

Perlakuan	Rata - rata Jumlah Koloni Bakteri (cfu/g)			
	Minggu I	Minggu II	Minggu III	Minggu IV
k1p1	3 x 10 ⁸ c	2,4 x 10 ⁸ c	1,3 x 10 ⁸ d	2,1 x 10 ⁸ d
k1p2	8,9 x 10 ⁸ bc	6,3 x 10 ⁸ bc	7,4 x 10 ⁸ bcd	5,7 x 10 ⁸ cd
k1p3	1,1 x 10 ⁹ bc	1 x 10 ⁹ bc	1,6 x 10 ⁹ ab	7 x 10 ⁸ cd
k2p1	2,2 x 10 ⁸ c	1,9 x 10 ⁹ abc	1,4 x 10 ⁹ b	9,3 x 10 ⁸ bcd
k2p2	1 x 10 ⁹ bc	2,6 x 10 ⁹ ab	1,5 x 10 ⁹ ab	1,7 x 10 ⁹ b
k2p3	4,5 x 10⁹ a	3,6 x 10⁹ a	2,6 x 10⁹ a	2,8 x 10⁹ a
k3p1	1,6 x 10 ⁸ c	3,8 x 10 ⁸ c	1,7 x 10 ⁸ cd	2 x 10 ⁸ d
k3p2	6,3 x 10 ⁸ bc	8,5 x 10 ⁸ bc	1,8 x 10 ⁸ cd	5,2 x 10 ⁸ d
k3p3	1,5 x 10 ⁹ b	9,6 x 10 ⁸ bc	1,2 x 10 ⁹ bc	1,4 x 10 ⁹ bc

NPBNJ 1089515096,89 2267732159,86 1134452503,95 874410917,65

Keterangan : Angka yang diikuti dengan huruf yang sama pada kolom (a,b,c,d) tidak berbeda nyata pada uji BNT α 0,05

Hasil pengamatan rata-rata jumlah koloni Bakteri Actinomycetes pada Minggu 1, Minggu 2, Minggu 3 dan Minggu 4 setelah inokulasi disajikan pada tabel 2.4, Analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pengayaan biochar tandan kosong kelapa sawit dengan perlakuan kerapatan bakteri actinomycetes yang beragam dengan kombinasi pengenceran biochar yang berbeda berpengaruh sangat nyata terhadap jumlah koloni bakteri actinomycetes pada periodik waktu pengamatan minggu 1, minggu 2, minggu 3 dan minggu 4. Uji BNJ α 0,05 pada Tabel 2.4, menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan Bakteri 10⁸ dengan pengenceran 10⁻⁷ (k2p3) menghasilkan rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar yaitu 4,5 x 10⁹ cfu/g di minggu 1 setelah inokulasi dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Pada minggu ke 2 setelah okulasi, uji BNJ α 0,05 pada Tabel 2.4, menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan Bakteri 10⁸ dengan pengenceran 10⁻⁷ (k2p3) menghasilkan rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar yaitu 3,6 x 10⁹ cfu/g dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan (k2p2 dan k2p1). Untuk minggu ke 3 setelah okulasi, uji BNJ α 0,05 pada Tabel 2.4, menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan Bakteri 10⁸ dengan pengenceran 10⁻⁷ (k2p3) menghasilkan rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar yaitu 2,6 x 10⁹ cfu/g dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan (k2p2 dan k1p3).). Untuk minggu ke 4 setelah okulasi, uji BNJ α 0,05 pada Tabel 2.4, menunjukkan bahwa perlakuan kerapatan Bakteri 10⁸ dengan pengenceran 10⁻⁷ (k2p3) menghasilkan rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar yaitu 2,8 x 10⁹ cfu/g dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Secara umum rata-rata jumlah koloni tertinggi pada biochar terjadi di minggu 1 setelah inokulasi pada perlakuan kerapatan Bakteri 10⁸ dengan pengenceran 10⁻⁷ (k2p3) yaitu 4,5 x 10⁹ cfu/g.

Jumlah rata-rata koloni bakteri actinomycetes yang tumbuh pada pengayaan pada berbagai perlakuan kerapatan menunjukkan bahwa biochar dapat menjadi pembawa yang efektif untuk inokulum mikroba khususnya bakteri actinomycetes karena sifat-sifatnya yang mendukung bagi kehidupan mikroba untuk aplikasi pertanian dan lingkungan. Luas dan muatan permukaan, porositas, gugus fungsi dan pH biochar dapat mempengaruhi penyerapan mikroba termasuk bakteri. Dengan porositas dan permukaan spesifiknya yang tinggi biochar dapat menyediakan ruang hidup bagi mikroorganisme (Zhang dkk., 2022). Satu sifat khusus misalnya, biochar memiliki pori-pori dalam jumlah besar yang cocok untuk kolonisasi mikroba dan perlindungan dari predator seperti protozoa, nematoda dan tungau. Pori-pori tersebut juga menyediakan situs aktif pada permukaan biochar yang dapat menyerap kontaminan yang memungkinkan penyerapan dan biodegradasi secara bersamaan (Wu et al., 2022). Dengan porositas dan permukaan spesifiknya yang tinggi biochar dapat menyediakan ruang hidup bagi mikroorganisme (Zhang dkk., 2022).

Karakteristik awal biochar tandan kosong kelapa sawit hasil analisis laboratorium menunjukkan pH 6,85, C 19,25 (%), N 0,95 (%), C/N 20, P 0,21 (%), Mg 0,58 (%), K 1,74 (%), KTK 32,65. dan mengalami perbaikan dan

kenaikan persentase karakteristik sebulan setelah inokulasi bakteri actinomicetes pada perlakuan kerapatan terbaik k2 (10) dengan pH 6,94, C 25,45 (%), N 1,41 (%), C/N 18, P 0,35 (%), Mg 0,92 (%), K 2,51 (%), KTK 46,35. Biochar yang diperkaya dapat berfungsi sebagai sumber nutrisi dan pembawa mikroba untuk aplikasi tanah karena sifatnya yang sangat berpori, yang meningkatkan kapasitas pembawa nutrisi dan mikrobai (Ajeng dkk., 2020;Khadem dkk., 2021.). Sifat-sifat fisikokimia biochar yang baik memungkinkan imobilisasi bakteri pada permukaannya, sehingga menghilangkan kontaminan organik (Wu dkk., 2022). Biochar diperkaya dengan karbon organik, mengandung nitrogen, fosfor, dan kalium sebagai nutrisi serta memiliki porositas dan kapasitas menahan air yang tinggi. Sejumlah besar gugus fungsional hidroksil, karboksil, asam sulfonat, asam amino, imino, dan asilamino hidroksil dan karboksil efektif untuk adhesi dan proliferasi sel mikroba.

Beberapa fitur penting biochar dengan porositas yang tinggi, mempertahankan ketersediaan air, meningkatkan pH, meningkatkan C-organik, P, K dan KTK dapat meningkatkan aktifitas populasi mikroba. Biochar mendukung tempat tinggal mikroba dengan sejumlah besar karbon organik, nutrisi termasuk N,P dan K, peningkatan porositas dan kapasitas menahan air yang tinggi (Li et al., 2019b; Wu., 2021b). Mikroorganisme yang diperkenalkan dengan biochar memungkinkan peningkatan tingkat kelangsungan hidup, dengan meningkatnya integrasi dan proliferasi mikroba di tanah dan rizosfer tanaman (Azeem et al., 2021). Inokulan berbasis biochar terbukti efektif dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan pemulihan tanah yang terkontaminasi (Tu et al., 2020).

2.6 Kesimpulan

1. Jumlah koloni bakteri actinomycetes tertinggi pada biochar terjadi di minggu 1 setelah inokulasi pada Kerapatan Bakteri 10^8 dengan pengenceran 10^{-7} (k2p3) yaitu $4,5 \times 10^9$ cfu/g
2. Pertumbuhan koloni tertinggi terjadi pada kondisi pH 7,93 dengan suhu 24,8 °C serta nilai kelembapan 66%.
3. Analisis Karakteristik menunjukkan biochar tandan kosong kelapa sawit kaya akan kandungan nutrisi C 19,25 (%), N 0,95 (%), P 0,21 (%), Mg 0,58 (%), K 1,74 (%), C/N 20, KTK 32,65,dengan pH 6,85.
4. Biochar merupakan pembawa yang efektif bagi inokulan mikroba actinomycetes.