

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA, KERANGKA PEMIKIRAN, DAN HIPOTESIS

2.1. Tinjauan pustaka

2.1.1 Klasifikasi dan morfologi kedelai

Kedelai adalah salah satu komoditas utama kacang-kacangan yang menjadi andalan Nasional karena merupakan sumber protein nabati (Hasanuddin, Hidajat, dan Partohardjono, 2005). Menurut Irwan (2006), kedelai merupakan tanaman asli Daratan Cina dan telah dibudidayakan oleh manusia sejak 2500 SM. Pada awalnya, kedelai dikenal dengan beberapa nama botani, yaitu *Glycine soja* dan *Soja max*. Pada tahun 1948 telah disepakati nama botani yang kedelai yaitu *Glycine max* (L.) Merrill. Klasifikasi kedelai adalah:

Kingdom : Plantae
Divisio : Spermatophyta
Subdivisio : Angiospermae
Classis : Dicotyledonae
Familia : Leguminosae
Genus : Glycine
Species : *Glycine max* (L.) Merrill

Menurut Adie dan Krisnawati (2013), kedelai merupakan tanaman semusim, tanaman tegak dengan tinggi 40 sampai 90 cm, bercabang, memiliki daun tunggal dan daun komposit beranak daun tiga, bulu pada daun, dan polong tidak terlalu padat, dan berumur antara 72 sampai 90 hari. Kedelai introduksi umumnya tidak memiliki atau memiliki sangat sedikit percabangan dan sebagian bertrikroma padat baik pada daun maupun pada polong.

a. Biji

Biji merupakan komponen morfologi kedelai yang bernilai ekonomis. Bentuk biji kedelai beragam dari lonjong hingga bulat dan sebagian besar kedelai yang ada di Indonesia berkriteria lonjong. Pengelompokan ukuran biji kedelai berbeda antar negara. Di Indoneia, kedelai dikelompokkan berdasarkan ukuran

berat per 100 biji, yaitu biji berukuran besar (berat lebih dari 14 gram/100 biji), sedang (10 sampai 14 gram/100 biji), dan kecil (kurang dari 10 gram/100 biji).. Biji sebagian besar tersusun dari kotiledon dan dilapis oleh kulit biji (*testa*). Antara kulit biji dan kotiledon terdapat lapisan endosperm (Adie dan Krisnawati, 2013).

Biji (semen) terletak di dalam polong, berjumlah 1 sampai 4 biji, waktu muda berukuran kecil, berwarna putih kehijauan, dan lunak. Dalam perkembangannya biji semakin berisi hingga mencapai berat maksimal dan keras, berkeping dua, terbungkus oleh kulit tipis. Bentuk biji umumnya bulat lonjong, bundar atau bulat agak pipih. Warna kulit biji antara lain kuning, hitam, hijau, atau coklat. Embrio terdapat diantara keping biji, dengan hilum atau pusar biji melekat pada dinding biji (Pitojo, 2003 dalam Logo dkk, 2017).

Proses awal terjadinya imbibisi benih adalah melalui kulit biji. Benih berkulit tipis lebih cepat menyerap air sehingga mempercepat perkecambahan benih, sebaliknya benih berkulit tebal proses imbibisinya lebih lambat (Yaklich dkk, 1986 dalam Adie dan Krisnawati, 2013).

b. Polong

Jumlah polong bervariasi mulai dari 2 sampai 20 dalam satu pembungaan dan lebih dari 400 dalam satu tanaman. Satu polong berisi 1 sampai 5 biji, namun pada umumnya berisi 2 sampai 3 biji per polong. Polong berlekuk lurus atau ramping dengan panjang 2 sampai 7 cm. Polong masak berwarna kuning muda sampai kuning kelabu, coklat, atau hitam (Adie dan Krisnawati, 2013). Pitojo (2003) dalam Logo dkk (2017) polong adalah buah bertrikoma berwarna kuning kecoklatan atau abu-abu. Tiap tanaman menghasilkan 100 sampai 250 polong, pada tanaman yang rapat hanya mampu dihasilkan 30 polong tiap tanaman. Polong muda berwarna hijau akan berubah selama proses pematangan menjadi kehitaman, keputihan atau kecoklatan saat polong tua. Bila polong telah kering mudah pecah dan mengeluarkan biji. Polong (legumen) dibentuk dari satu daun buah, memiliki satu ruangan atau lebih dipisahkan oleh sekat-sekat semu. Bila polong tua dan matang, akan pecah menurut kampuhnya yaitu kampuh perut dan kampuh punggung, atau terpisah sepanjang sekat-sekat semunya. Karena adanya

sekat-sekat semu, ruang polong terbagi atas beberapa bilik, berisi satu biji tiap biliknya.

c. Akar

Sistem perakaran kedelai terdiri dari sebuah akar tunggang yang terbentuk dari calon akar, sejumlah akar sekunder yang tersusun dalam empat barisan sepanjang akar tunggang, cabang akar sekunder, dan cabang akar adventif yang tumbuh dari bagian bawah hipokotil. Bintil akar pertama terlihat 10 hari setelah tanam (Adie dan Krisnawati, 2013).

Panjang akar tunggang ditentukan oleh berbagai faktor, seperti kekerasan tanah, populasi tanaman, varietas, dan sebagainya. Akar tunggang dapat mencapai kedalaman 200 cm, namun pada pertanaman tunggal dapat mencapai 250 cm (Adie dan Krisnawati, 2013).

Populasi tanaman yang rapat dapat mengganggu pertumbuhan akar. Umumnya sistem perakaran terdiri dari akar lateral yang berkembang 10 sampai 15 cm di atas akar tunggang. Dalam berbagai kondisi, sistem perakaran terletak 15 cm di bawah tanah yang tetap berfungsi mengabsorpsi dan mendukung kehidupan tanaman (Carlson 1973 dalam Adie dan Krisnawati, 2013).

Kedelai yang tergolong tanaman leguminosa dicirikan oleh kemampuannya membentuk bintil akar, yang salah satunya adalah oleh *Rhizobium japonicum*, yang mampu menambat nitrogen dan bermanfaat bagi tanaman. Akar mengeluarkan beberapa substansi khususnya triptofan yang menyebabkan perkembangan bakteri dan mikroba lain di sekitar daerah perakaran (Adie dan Krisnawati, 2013).

d. Batang

Batang kedelai berasal dari poros embrio yang terdapat pada biji masak. Hipokotil merupakan bagian terpenting pada poros embrio, yang berbatasan dengan bagian ujung bawah permulaan akar yang menyusun bagian kecil dari poros bakal akar hipokotil (Adie dan Krisnawati, 2013).

Bagian atas poros embrio berakhir pada epikotil yang terdiri dari dua daun sederhana, yaitu primordia daun bertiga pertama dan ujung batang. Sistem perakaran di atas hipokotil berasal dari epikotil dan tunas aksiler. Pola

percabangan akar dipengaruhi oleh varietas dan lingkungan, seperti panjang hari, jarak tanam, dan kesuburan tanah (Adie dan Krisnawati, 2013).

e. Daun

Daun kedelai terbagi menjadi empat tipe, yaitu: (1) kotiledon atau daun biji, (2) dua helai daun primer sederhana, (3) daun bertiga, dan 4) profila. Daun primer berbentuk oval dengan tangkai daun sepanjang 1 sampai 2 cm, terletak berseberangan pada buku pertama diatas kotiledon. Setiap daun memiliki sepasang stipula yang terletak pada dasar daun yang menempel pada batang (Adie dan Krisnawati, 2013).

Tipe daun yang lain terbentuk pada batang utama, dan pada cabang lateral terdapat daun trifoliat yang secara bergantian dalam susunan yang berbeda. Anak daun bertiga mempunyai bentuk yang bermacam-macam, mulai bulat hingga lancip. Ada kalanya terbentuk 4 sampai 7 daun dan dalam beberapa kasus terjadi penggabungan daun lateral dengan daun terminal (Adie dan Krisnawati, 2013).

Daun tunggal mempunyai panjang 4 sampai 20 cm dan lebar 3 sampai 10 cm. Tangkai daun lateral umumnya pendek sepanjang 1 cm atau kurang. Dasar daun terminal mempunyai dua stipula kecil dan tiap daun lateral mempunyai sebuah stipula (Adie dan Krisnawati, 2013).

Setiap daun primer dan daun bertiga mempunyai pulvinus yang cukup besar pada titik perlekatan tangkai dengan batang. Pulvini berhubungan dengan pergerakan daun dan posisi daun selama siang dan malam hari yang disebabkan oleh perubahan tekanan osmotik di berbagai bagian pulvinus (Adie dan Krisnawati, 2013).

f. Bunga

Kedelai merupakan tanaman menyerbuk sendiri yang bersifat kleistogami. Periode perkembangan vegetatif bervariasi tergantung pada varietas dan keadaan lingkungan, termasuk panjang hari dan suhu. Tanaman memasuki fase reproduktif saat tunas aksiler berkembang menjadi kelompok bunga dengan 2 hingga 35 kuntum bunga setiap kelompok (Adie dan Krisnawati, 2013).

Bunga (*flos*), akan muncul pada ketiak daun, tumbuh berkelompok pada ruas-ruas batang, berwarna putih atau ungu (Irwan, 2016 dalam Logo dkk, 2017),

memiliki kelamin jantan dan betina. Mulai berbunga pada umur tanaman antara 30 sampai 50 hari setelah tanam. Penyerbukan terjadi pada saat mahkota bunga masih menutup, sehingga kemungkinan terjadinya persilangan alami sangat kecil. Bunga akan rontok sekitar 60 % sebelum membentuk polong (Pitojo, 2003 dalam Logo dkk, 2017).

Ada dua tipe pertumbuhan batang dan permulaan pembungaan pada kedelai. Tipe pertama adalah indeterminat, yaitu tunas terminal melanjutkan fase vegetatif selama pertumbuhan. Tipe kedua adalah determinat dimana pertumbuhan vegetatif tunas terminal terhenti ketika terjadi pembungaan (Adie dan Krisnawati, 2013).

Buku pada bunga pertama berhubungan dengan tahap perkembangan tanaman. Ketika buku kotiledon, daun primer, dan daun bertiga dalam fase vegetatif, bunga pertama muncul pada buku kelima atau keenam dan atau buku di atasnya. Bunga muncul kearah ujung batang utama dan kearah ujung cabang (Adie dan Krisnawati, 2013).

Periode berbunga dipengaruhi oleh waktu tanam, berlangsung 3 sampai 5 minggu. Berbagai penelitian menyebutkan bahwa tidak semua bunga kedelai berhasil membentuk polong, dengan tingkat keguguran 20 sampai 80% (Adie dan Krisnawati, 2013).

Umumnya varietas dengan banyak bunga per buku memiliki presentase keguguran bunga yang lebih tinggi daripada yang berbunga sedikit. Keguguran bunga dapat terjadi pada berbagai fase perkembangan, mulai dari pertunasan, perkembangan organ-organ pembungaan, pembuahan, perkembangan awal embrio, atau pada tahapan perkembangan kotiledon (Adie dan Krisnawati, 2013).

g. Bintil akar

Pembentukan bintil akar diawali dengan kehadiran *Rhizobium* pada ujung rambut akar yang berkembang yang menyebabkan rambut akar mengalami deformasi dan menjadi keriting (Stacey and Keen, 1995 dalam Kumalasari, 2005). Menurut Rao (1994) dalam Kumalasari (2005), bakteri *Rhizobium* dapat bersimbiosis hanya dengan tumbuh-tumbuhan legum, dengan menginfeksi akarnya dan membentuk bintil akar di dalamnya.

Menurut Uheda dkk. (2001) dalam Suryantini (2015) terdapat dua cara infeksi *Rhizobium* untuk membentuk bintil akar pada akar kacang-kacangan yaitu infeksi melalui rambut akar (*root hair entry*) dan melalui celah (*crack entry*). Infeksi melalui rambut akar terjadi pada sebagian besar kacang-kacangan, termasuk kedelai, sedangkan infeksi melalui celah hanya terjadi pada beberapa kacang-kacangan termasuk kacang tanah.

Proses infeksi *Rhizobium* pada tanaman leguminosa umumnya terjadi dalam empat tahap, pra infeksi, yaitu kolonisasi rhizobia di daerah rizosfer, penempelan di permukaan akar, penyabangan rambut akar dan pembengkokan rambut akar. Pada tanaman kacang tanah infeksiya berbeda karena rambut-rambut akar yang normal tidak dijumpai. Akan tetapi bentuk menyerupai jumbai sering ditemukan pada bagian sambungan axil akar. Pada axil akar tersebut akan terbentuk akar lateral, dan pada akar lateral terjadi bintil. Bakteri *Rhizobium* masuk ke dalam akar melalui pangkal akar lateral, karena pada tempat munculnya akar lateral tersebut terjadi patahan di epidermis dan korteks sehingga membentuk celah yang dapat dimasuki oleh bakteri *Rhizobium*. Oleh karena itu bintil akar pada kacang tanah hanya berkembang pada tempat munculnya akar lateral (Uheda dkk., 2001; Tajima dkk., 2008 dalam Suryantini, 2015).

Bintil akar terdiri dari bintil akar efektif dan bintil akar tidak efektif. Perbedaan kedua macam bintil akar tersebut adalah dalam bentuk, warna, dan letaknya pada akar. Bintil akar efektif letaknya tersebar pada akar tunggang, bintil akar tidak efektif tersebar pada akar lateral, akar cabang, dan berwarna pucat (Sarief, 1994 dalam Kumalasari, 2005). Menurut Lamina (1989), bintil akar dengan massa hijau tidak aktif dalam fiksasi nitrogen, sedangkan warna merah aktif dalam fiksasi nitrogen. Rao (1981) dalam Kumalasari (2005), menyebutkan bahwa bintil tidak efektif umumnya berukuran kecil dan terdapat sedikit bakteroid. Bintil akar efektif terdiri banyak bakteroid dan umumnya berukuran lebih besar. Berdasarkan beberapa penelitian, bintil akar akan lapuk pada saat tanaman memasuki fase pembentukan polong.

Menurut Rao (1994) dalam Kumalasari (2005), pembentukan bintil akar pada tanaman legum dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

1. Suhu dan cahaya

Suhu yang menguntungkan untuk pembentukan jaringan bakteroid di dalam bintil antara 20 sampai 30 °C. Pada kedelai, bakteri paling efektif pada suhu 33 °C. Selain itu, cahaya mempengaruhi pembentukan, ukuran, dan jumlah bintil akar. Hasil dari fotosintesis mempengaruhi perbintilan.

2. Nitrogen terkombinasi

Pada kondisi lingkungan yang terkendali, nitrogen mineral di atas tingkat tertentu mempengaruhi infeksi pada rambut akar, jumlah bintil, struktur bintil dan jumlah nitrogen yang difiksasi.

3. Konsentrasi ion hidrogen

Tumbuhan legum tumbuh kurang subur pada media masam dibanding keadaan netral atau sedikit basa yang secara tidak langsung disebabkan oleh berkurangnya kolonisasi *Rhizobium* dalam tanah yang menyebabkan tidak cukup untuk pembentukan bintil akar.

4. Nutrisi mineral

Pemberian nutrisi mineral pada legum meningkatkan jumlah bintil pada perakaran dan juga meningkatkan pertumbuhan dan kandungan nitrogen.

5. Zat tumbuh

Pengaruh zat tumbuh terhadap perbintilan bervariasi. Beberapa zat tumbuh merangsang pembentukan bintil sedang yang lain menghambat, tergantung konsentrasi zat kimia yang digunakan.

6. Faktor genetik

Varietas yang berbeda dari legum yang sama diketahui berbeda responsnya terhadap *Rhizobium* tertentu, terutama dalam hal jumlah bintil yang terbentuk pada tanaman legum.

7. Faktor ekologis

Penggunaan pestisida mempengaruhi proses mikrobiologis dalam tanah. Herbisida mempengaruhi perbintilan dan fiksasi nitrogen pada legum.

8. Rhizobiotoksin

Rhizobium japonicum dalam bintil akar menghasilkan toksin (fitotoksin) yang menyebabkan klorosis pada kedelai.

9. Salinitas dan alkalinitas

Salinitas dan alkalinitas di dalam daerah perakaran menghambat tahap tertentu dari tahap pra infeksi dalam simbiosis legum dengan *Rhizobium*.

2.1.2 Kesesuaian agroklimat kedelai

Respon tanaman terhadap lingkungan berbeda-beda tergantung jenis dan kultivar tanaman. Tanaman dapat memberikan respon positif maupun negatif terhadap perubahan lingkungan tumbuh. Komponen lingkungan tumbuh pada kedelai secara umum terbagi menjadi dua kelompok, yaitu kesesuaian agroklimat dan tanah. Komponen ini sangat menentukan keberhasilan usahatani kedelai baik pada lahan sawah, lahan kering, maupun lahan ekstensifikasi lainnya (Atman, 2014).

Komponen lingkungan tumbuh pada kedelai dibagi atas empat tingkat kriteria kesesuaian agroklimat, yaitu : *sangat sesuai*, *sesuai*, *sesuai bersyarat/agak sesuai*, dan *tidak sesuai*. *Sangat sesuai* apabila suatu agroklimat memungkinkan tanaman kedelai tumbuh optimal dan berproduktivitas maksimal. *Sesuai* berarti tanaman kedelai tumbuh normal dengan hasil di atas rata-rata namun lebih rendah dari produktivitas maksimal. *Sesuai bersyarat/agak sesuai* berarti apabila tanaman kedelai ditanam pada suatu wilayah agroklimat namun memerlukan perlakuan agronomi tertentu, seperti pengapuran, pengairan, pembenahan tanah, pembuatan teras, pencegahan erosi, dan atau perlakuan lainnya. *Kurang sesuai* atau *tidak sesuai* berarti apabila hampir seluruh komponen agroklimatnya tidak/kurang sesuai untuk usahatani kedelai dengan skala luas secara ekonomi (Atman, 2014). Pada Tabel 1 dapat dilihat tentang kriteria kesesuaian lahan untuk budidaya kedelai.

Tabel 1. Kriteria Kesesuaian Lahan untuk Tanaman Kedelai

Karakteristik	Persyaratan tingkat kesesuaian lahan			
	Sangat Sesuai	Sesuai	Sesuai Bersyarat	Tidak Sesuai
Suhu				
Suhu rata-rata °C	23-28	29-30 22-20	31-32 19-18	> 32 < 18
Ketersediaan air				
Bulan kering (<75 mm)	3-7,5	7,6-8,5	8,6-9,5	> 9,5
Curah hujan rata-rata (mm/tahun)	1000-1500	1500-2500 1000-700	2500-3500 700-500	> 3500 < 500
Curah hujan selama tanam (mm/3 bulan)	300-400	200-300 400-600	100-200 600-900	< 100 > 900
Lingkungan akar				
Drainase	Baik, Cukup baik	Agak berlebihan	Cepat	Sangat cepat
Tekstur tanah *	L, S, CL, SiL, Si, CL, SiCL	SL, SC	LS, SiC, C	Mass. C
Kedalaman tanah (cm)	> 50	30-49	15-29	< 15
Retensi hara				
KTK (me/100 g)	> 25	25-15	15-5	< 20
pH	6,0-6,5	6,6-7,0 5,0-6,0	4,5-5,5	< 4,5 > 7,0
Ketersediaan hara				
N total (%)	> 1,0-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	< 0,1
P ₂ O ₅ tersedia (Bray 4) (ppm)	> 50	50-15	15-5	< 5
P ₂ O ₅ tersedia (Olsen 3) (ppm)	> 15	15-5	2-5	< 2
K tersedia (me/100 g)	0,8-0,4	0,4-0,2	0,2-0,3	< 0,2
Salinitas/kegaraman (mmhos/cm)				
Lapis tanah bawah	< 2,5	2,5-4	4-8	> 8
Terrain (s)				
Kemiringan lahan (%)	0-5	5-15	15-20	> 20
Batu di permukaan (%)	Tidak ada	< 5	5-25	> 25

Tabel 1. Kriteria Kesesuaian Lahan untuk Tanaman Kedelai (lanjutan)

Karakteristik	Persyaratan tingkat kesesuaian lahan			
	Sangat Sesuai	Sesuai	Sesuai Bersyarat	Tidak Sesuai
Elevasi (mdpl)	< 700	700-1000	1000-3000	> 3000
Naungan (%)	< 8	8-15	15-25	> 25
Kejenuhan				
AI (%)	< 20	20-30	30-40	> 40
Basa (%)	> 20	15-20	10-15	< 10

Keterangan: *Tekstur : Clay (C) = lempung, Clay loam (CL) = geluh berlempung, Loam (L) = geluh, Sandy clay loam (SCL) = geluh lempung berpasir, Sandy clay (SC) = lempung berpasir, Sandy loam (SL) = geluh berpasir, Silt (Si) = debu, Silty clay (SiC) = lempung berdebu, Silt loam (SiL) = geluh berdebu, Sand (S) = pasir, Gravels (G) = berbatu, Massive clay (Mass.C) = lempung pejal. Sumber: CSR-FAO (1983); Landon (1984); Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (1993) dalam Sudaryono, Taufiq, dan Wijanarko (2013); Abdurachman, Mulyani, dan Irawan (2013); Sumarno dan Manshuri (2007); Sudaryono (2009) dalam Atman (2014).

Pengaruh suhu dan panjang hari terhadap pertumbuhan kedelai menurut Harnowo, dkk (2007) dalam Atman (2014) disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Pengaruh Suhu dan Panjang Hari terhadap Pertumbuhan Kedelai

Faktor	Pengaruh terhadap Pertumbuhan/Fisiologis Kedelai
Suhu rendah, < 18°C	Umur berbunga panjang, umur panen lambat (dalam), batang lebih tinggi, biji lebih bernas
Suhu kardinal, 19-24°C	Umur berbunga normal, tanaman pada tanah subur tumbuh optimal
Suhu agak tinggi, 25-36°C	Tanaman tumbuh normal dan baik asal kelembaban tanah cukup
Suhu tinggi, 30-36°C	Tanaman tumbuh pendek, cepat berbunga, bila air kurang tanaman merana
Panjang hari < 12 jam	Tanaman cepat berbunga, cepat panen, tanaman tumbuh pendek
Panjang hari 12-12,5 jam	Pertumbuhan normal, umur berbunga normal, umur panen normal
Panjang hari 12,5-13,5 jam	Tanaman tumbuh tinggi, berbunga lambat, panen lambat, hasil biji meningkat
Panjang hari > 14 jam	Pertumbuhan vegetatif subur, tanaman tidak dapat berbunga

2.1.3 Kondisi lahan terdampak pertambangan emas

Kegiatan pertambangan emas yang dilakukan secara tradisional, proses pengolahannya tidak menggunakan teknologi yang tinggi dan hanya menggunakan peralatan yang sangat sederhana. Dalam operasionalnya, kegiatan penambangan akan menghasilkan limbah yaitu limbah penambangan dan limbah pengolahan (Aziz, 2014).

Limbah penambangan berupa batu bongkahan dan apabila terdapat banyak mineral sulfida ditambah kehadiran udara dan curah hujan yang cukup tinggi serta adanya bakteri alam tertentu seperti *Thiobacillus Ferrooxidan* akan berpotensi untuk terbentuknya air asam tambang (*acid mine drainage*). Air asam tambang ini apabila memasuki aliran permukaan akan merusak kehidupan tanaman dan mengubah kimia dan biologi tanah, dan apabila masuk ke dalam badan air akan memobilisasi logam-logam dari tailing yang merupakan limbah dari hasil pengolahan batuan (Aziz, 2014).

Secara umum, teknik pengolahan bahan galian emas yang digunakan adalah proses amalgamasi dengan campuran air raksa (merkuri atau air perak). Permasalahan yang dihadapi adalah kegiatan pertambangan dan proses amalgamasi dilakukan di sekitar areal pertanian, mengakibatkan lahan pertanian tercemar oleh limbah tambang emas (*tailing*) sukar untuk dimanfaatkan kembali sebagai lahan pertanian. dampak dari tailing yang paling besar adalah terhambatnya pertumbuhan tanaman karena ketersediaan hara rendah terutama N, P, dan C-organik, KTK, serta pH yang rendah (Hamzah dkk, 2012).

Komponen yang paling mendapat sorotan dari kegiatan pengolahan emas adalah merkuri, di mana merkuri digunakan sebagai pengikat konsentrat emas. Merkuri tergolong logam berat yang berpotensi sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) apabila dilepas ke lingkungan (Aziz, 2014). Logam berat adalah unsur logam yang memiliki berat jenis lebih dari lima dan dapat membentuk garam pada kondisi asam. Unsur logam berat di dalam tanah dapat berada dalam bentuk garam, hidroksida dan oksida, larutan tanah, berikatan dengan mineral maupun dalam bentuk senyawa kompleks logam organik (Koeman, 1987 dalam Haryono dan Soemono, 2009).

Menurut Arnold (1990); Steinnes (1990); Wijanto (2005) dalam Haryono dan Soemono (2009), logam berat yang beracun dan berbahaya adalah merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan krom (Cr). Logam berat Pb, Cd, Hg, selain mengancam kesehatan tanaman dan ternak, juga berdampak terhadap kesehatan dan kecerdasan manusia. Merkuri (Hg) merupakan unsur yang paling beracun terhadap manusia dan hewan, serta tidak diketahui fungsi biologis esensialnya. Logam merkuri (Hg^{2+}) merupakan salah satu dari ion logam yang paling beracun terhadap biota tanah.

2.1.4 Pupuk hayati

Pupuk hayati (*biofertilizer*) didefinisikan sebagai bahan yang mengandung mikroorganisme hidup yang mengkolonisasi rhizosfir atau bagian dalam tanaman dan memacu pertumbuhan tanaman dengan jalan meningkatkan pasokan ketersediaan hara primer dan atau stimulus pertumbuhan tanaman target, bila dipakai pada benih, permukaan tanaman, atau tanah (FNCA *Biofertilizer Project Group*, 2006 dalam Rajiman, 2017).

Menurut Permentan No.2 tahun 2006 dalam Kartikawati, Trislawati, dan Darwati (2017), pupuk hayati digolongkan kedalam bahan pembenah tanah, bukan pupuk organik. Dalam peraturan tersebut, pupuk hayati merupakan sekumpulan organisme hidup yang aktivitasnya bisa memperbaiki kesuburan tanah.

Pupuk hayati adalah produk biologi aktif terdiri dari mikroorganisme yang dapat meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan dan kesehatan tanah, sedangkan komposisi mikroorganisme/mikrofauna dan bahan pembawa penyusun pupuk hayati merupakan formula pupuk hayati (Permentan No.28/Permentan/SR.130/5/2009 dalam Kartikawati dkk, 2017).

Pupuk hayati berperan menjaga lingkungan tanah melalui fiksasi N pada tanah yang kaya jenis mikro dan makro-nutrisi, pelarutan P dan kalium atau mineralisasi, pelepasan zat pengatur tumbuh tanaman, serta produksi antibiotik dan biodegradasi bahan organik (Singh dkk., 2014 dalam Kartikawati dkk, 2017).

Pupuk hayati berperan meningkatkan ketersediaan unsur hara tanaman dalam tanah karena mikroorganisme dalam pupuk hayati melakukan dekomposisi

dan mineralisasi hara dari bahan organik tanah, pelarutan hara dari unsur anorganik yang kompleks, dan memperbaiki sifat fisik tanah (James dkk., 2000 dalam Kartikawati dkk, 2017). Pupuk hayati juga dapat meningkatkan mikroorganisme tanah yang bermanfaat, meningkatkan ketersediaan hara, memperbaiki agregat tanah, menghasilkan zat pemacu tumbuh dan tidak berbahaya bagi lingkungan (Syaputra dkk., 2011 dalam Kartikawati dkk, 2017).

Secara garis besar pupuk hayati terdiri dari kelompok penambat N (simbiotik dan nonsimbiotik), Pemobilisasi P (*phosphate mobilizing biofertilizers*) meliputi mikroba pelarut P dan mikoriza, sellulolitik atau organisme pengurai bahan organik (*organic matter decomposer*), dan kelompok PGPR (*plant growth promoting rhizobacteria*) (Simarmata, Joy, dan Danapriatna, 2012). Dibandingkan dengan pupuk anorganik (*chemical fertilizers*), pupuk hayati dapat berfungsi ganda (*multipurpose*) yaitu meningkatkan ketersediaan hara, menghasilkan pemacu tumbuh (PGPR), dan agen hayati yang dapat menekan pertumbuhan mikroba patogen (Kloepper, 1993; Sharma dkk., 2004; Sunita, 2010; Simarmata, 2011; Panda, 2011 dalam Simarmata dkk, 2012).

Pemupukan dengan pupuk hayati memiliki banyak manfaat terutama dalam hal kesuburan biologis tanah sehingga dapat menunjang pertumbuhan tanaman, peningkatan produksi, dan efisiensi pemupukan kimia (Sembiring, Nugroho, dan Istianto, 2013). Menurut Nasahi (2010), mikroorganisme yang umum digunakan sebagai bahan aktif pupuk hayati ialah mikroorganisme penambat N, pelarut P, dan mikroorganisme penghasil zat pengatur tumbuh (ZPT). Mikroorganisme yang teridentifikasi sebagai penyedia unsur nitrogen antara lain: *Azotobacter chroococcum*, *Azotobacter beijerinckii*, *Azospirillum lipoperum*. Kelompok mikroorganisme pelarut fosfat antara lain *Bacillus megaterium*, *Bacillus cereus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas diminuta*, dan *Penicillium* (Syarifuddin, 2002).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi bakteri aerobik *Azotobacter sp* yang hidup bebas dalam tanah memberikan pengaruh positif pada berbagai tanaman. Studi lain menunjukkan bahwa *Azotobacter* selain efektif untuk

fiksasi nitrogen juga memproduksi hormon tumbuh, bahan fungisida, siderofor, dan mampu melarutkan fosfat (Jalilian dkk., 2012 dalam Kartikawati dkk, 2017).

Kesuburan tanah yang rendah memerlukan perbaikan kondisi tanah sekaligus pemupukan yang efektif. Pemberian pupuk hayati diharapkan dapat membantu meningkatkan kesuburan lahan sulfat terdegradasi, dan sekaligus meningkatkan efisiensi pemupukan NPK (Susilawati dan Maftuah, 2016).

Penggunaan mikroba dalam tanah merupakan upaya untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman secara alami, dengan memanfaatkan mikroorganisme hidup ke dalam tanah sebagai inokulan untuk membantu tanaman memfasilitasi atau menyediakan unsur hara tertentu bagi tanaman. *Rhizobium* sangat diperlukan terutama pada lahan yang belum diusahakan untuk kedelai (Susilawati dan Maftuah, 2016).

Penggunaan mikroba penyubur tanah dapat memberikan berbagai manfaat, yaitu menyediakan sumber hara bagi tanaman, melindungi akar dari gangguan hama dan penyakit, menstimulir sistem perakaran agar berkembang sempurna dan memperpanjang usia akar, memacu mitosis jaringan meristem pada titik tumbuh pucuk, kuncup bunga, dan stolon, sebagai penawar racun beberapa logam berat, sebagai metabolit pengatur tumbuh, dan sebagai bioaktivator (Saraswati dan Sumarno, 2008).

2.1.5 Kandungan mikroba tanah dalam pupuk hayati

1. *Azotobacter*

Azotobacter diketahui mampu mensintesis substansi yang secara biologis aktif dapat meningkatkan perkecambahan biji, tegakan dan pertumbuhan tanaman seperti vitamin B, asam indol asetat, giberelin, dan sitokinin. Bakteri *Azotobacter* yang diaplikasikan pada tanah pertanian akan terus mempersubur tanah karena bakteri tersebut akan semakin banyak jumlahnya di dalam tanah dan terus bekerja memfiksasi nitrogen dan menaikkan biomassa tanaman pertanian. Bakteri *Azotobacter* adalah species rizobakteri yang dikenal sebagai agen penambat nitrogen yang mengkonversi dinitrogen (N_2) ke dalam bentuk ammonium (NH_3), yang mampu menambat nitrogen dalam jumlah yang cukup tinggi (Luqman, Shovitri, dan Zulaika, 2012).

Azotobacter merupakan salah satu genera bakteri yang berpotensi digunakan sebagai agen bioremediasi pada lingkungan yang tercemar logam berat. *Azotobacter* merupakan salah satu genera bakteri yang resisten terhadap logam berat Hg, Pb, Cd, dan Cu (Zulaika dkk., 2012 ; Ghosh dkk., 1997 dalam Luqman, dkk, 2012). *Azotobacter* juga merupakan bakteri pemfiksasi nitrogen yang dapat meningkatkan kadar nitrogen di tanah (Madigan dan Martinko, 2006 dalam Luqman dkk, 2012), sehingga sangat berpotensi untuk diaplikasikan pada lingkungan yang tercemar logam berat sekaligus sebagai agen biofertilizer lahan yang kekurangan unsur nitrogen.

Bakteri tersebut hidup bebas pada daerah perakaran dan jaringan tanaman. Bakteri penambat N sering disebut bakteri *diazotrof* yang mampu menggunakan N udara sebagai sumber N untuk pertumbuhannya. Peranan bakteri dalam memfiksasi nitrogen udara besar pengaruhnya terhadap nilai ekonomi tanah pertanian (Ristiati dkk., 2008 dalam Widiyawati dkk, 2014). Penggunaan bakteri ini berpotensi mengurangi kebutuhan N sintetik, meningkatkan produksi dan pendapatan usaha tani dengan masukan yang lebih murah (Widiyawati dkk, 2014).

Azotobacter merupakan bakteri pemfiksasi N₂ yang mampu menghasilkan substansi zat pemacu tumbuh giberelin, sitokinin, dan asam indolasetat, sehingga dapat memacu pertumbuhan akar (Alexander 1977 dalam Saraswati dan Sumarno, 2008). *Azotobacter* sp. merupakan bakteri non simbiotik yang mampu menambat N dari udara. Bakteri *Azotobacter* sp. banyak dijumpai di daerah rizosfer (dalam tanah 20 sampai 8.000 sel/g) pada pH tanah antara 5,9 sampai 8,4 dan bersifat aerobik. Selain mampu menambat nitrogen, bakteri ini juga mengeluarkan hormon yang sama dengan hormon pertumbuhan tanaman, seperti giberelin, IAA, kinetin, dan vitamin B. Vitamin B ini berfungsi untuk aktivitas bakteri dalam peningkatan kemampuan memfiksasi N dari atmosfer. *Azotobacter* sp. dapat meningkatkan pertumbuhan melalui pasokan nitrogen, pasokan pengatur tumbuh, dan membuat kondisi tanah lebih menguntungkan untuk pertumbuhan tanaman (Alexander, 1977 dalam Sembiring dkk, 2013).

2. *Bacillus sp.*

Bacillus merupakan salah satu mikroba tanah yang dapat digunakan sebagai Bakteri Pelarut Fosfat (BPF). Untuk mengatasi rendahnya P tersedia atau kejenuhan P dalam tanah adalah dengan memanfaatkan kelompok mikroorganisme pelarut P sebagai pupuk hayati. Mikroorganisme pelarut P adalah mikroorganisme yang dapat melarutkan P sukar larut menjadi larut, baik yang berasal dari dalam tanah maupun dari pupuk, sehingga dapat diserap oleh tanaman (Saraswati dan Sumarno, 2008). BPF berperan dalam transfer energi, penyusunan protein, koenzim, asam nukleat, vitamin dan fitohormon yang dapat memperbaiki pertumbuhan akar tanaman, serta meningkatkan serapan hara sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemupukan (Glick, 1995; Rao, 1994 dalam Sembiring dkk, 2013).

Bacillus sebagai salah satu genus mikroba juga dapat dimanfaatkan sebagai bioakumulator merkuri (Hg) dengan proses kerja *Bacillus* mereduksi ion Hg^{2+} menjadi Hg^0 volatil yang dilepas ke lingkungan, dimana Hg^0 relatif tidak toksik apabila dibandingkan dengan Hg^{2+} dan CH_3Hg^+ . Diharapkan semakin banyak jumlah sel *Bacillus* akan semakin banyak enzim merkuri reduktase yang dihasilkan sehingga reduksi merkuri semakin kuat (Zulaika, Sholikah, dan Prasetya, 2012). Resistensi dan kekuatan reduksi *Bacillus* terhadap merkuri di lingkungannya tergantung pada jumlah sel yang digunakan. Semakin padat jumlah sel maka resistensi dan daya reduksi *Bacillus* akan semakin tinggi (Bogdanova, 1998 dalam Zulaika dkk, 2012).

3. *Lactobacillus sp.*

Agensia organik yang dapat meningkatkan kemantapan agregat tanah ialah produk dekomposisi biomassa, eksopolisakarida (EPS) asal bakteri, miselium fungi, dan produk hasil sintesis tanaman (Kim dkk., 1996; Sutherland, 1997 dalam Kusuma, Wicaksono, dan Prasetya, (2016). Menurut Kusuma dkk (2016), bakteri *Lactobacillus fermentum* merupakan bakteri asam laktat yang menghasilkan eksopolisakarida dan tergolong gram positif, bakteri gram positif akan mengikat partikel tanah membentuk agregat.

Berdasarkan penelitian Kusuma dkk (2016), perlakuan dengan inokulan tunggal *Lactobacillus fermentum* ke dalam tanah beragregat kurang stabil mengindikasikan adanya peningkatan kemantapan agregat dari 10, 20, dan 30 hari inkubasi. Pada masing-masing perlakuan pemberian bakteri berpengaruh sangat nyata terhadap peningkatan kemantapan agregat. Sejalan dengan lama waktu inkubasi sampai 30 hari indeks kemantapan agregat pada masing-masing perlakuan meningkat.

Lactobacillus juga memproduksi sejumlah bahan kimia/asam-asam yang dapat merekatkan tanah. Pertumbuhan struktur miselium akan semakin meningkat apabila semakin lama waktu inkubasi. Bakteri mampu mengeluarkan suatu polisakarida berupa lendir yang berfungsi sebagai gum (perekat) dan metabolit lain untuk membentuk agregat tanah. Sedangkan jamur/kapang dari struktur tubuhnya berupa hifa mampu mengikat partikel tanah untuk membentuk agregat tanah (Anas, 1989 dalam Kusuma dkk, 2016).

4. *Saccharomyces* sp.

Saccharomyces merupakan genus khamir/ragi/yeast yang memiliki kemampuan mengubah glukosa menjadi alkohol dan CO₂. Ragi atau fermentasi merupakan zat yang biasa dimanfaatkan untuk fermentasi. Ragi biasanya mengandung mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* (Istamar, 2007 dalam Nurlaila, 2016).

Ragi bersifat katabolik atau memecah komponen yang kompleks menjadi zat yang lebih sederhana sehingga lebih terurai. Eulis (2009) dalam Nurlaila (2016) menyatakan bahwa ragi *Saccharomyces cerevisiae* dapat digunakan sebagai aktivator dalam proses pengomposan, selain itu ragi *Sacharomyces cerevisiae* mempunyai sifat pereduksi yang kuat, sehingga dapat mendegradasi bahan organik.

Ragi (*yeast*) berfungsi mengurai bahan organik dan membentuk zat anti bakteri, dapat pula membentuk zat aktif (substansi bioaktif) dan enzim yang berguna untuk pertumbuhan sel dan pembelahan akar. Ragi ini juga berperan dalam perkembangan mikroorganisme lain yang menguntungkan seperti *Actynomicetes* dan *Lactobacillus* sp (Nurlaila, 2016).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Nurlaila (2016) yang membandingkan penggunaan ragi (yeast) dengan pupuk hayati EM4 sebagai aktivator untuk membuat pupuk organik cair dari tanaman apu–apu menyatakan bahwa ragi (yeast) mampu menguraikan bahan-bahan organik pada pembuatan pupuk organik cair dari apu-apu, nilai kandungan unsur nitrogen sama banyaknya dengan menggunakan EM4, namun kandungan unsur fosfor dan kalium lebih rendah.

Beberapa kelebihan *Saccharomyces* dalam proses fermentasi yaitu mikroorganisme ini cepat berkembang biak, tahan terhadap kadar alkohol yang tinggi, tahan terhadap suhu yang tinggi, mempunyai sifat stabil dan cepat mengadakan adaptasi serta dapat meningkatkan kesuburan tanah serta produktivitas tanaman. *Saccharomyces* dapat digunakan sebagai agensia hayati dalam melakukan fermentasi pada pupuk organik dan dalam waktu 1 sampai 2 minggu sudah dapat diaplikasikan pada kegiatan budidaya tanaman (Kuswaya, 2017).

Penelitian Kuswaya (2017) tentang pemanfaatan pupuk organik yang berasal dari limbah industri penyamakan kulit yang difermentasikan menggunakan *M-Bio* sebagai fermentor; karena M-Bio mengandung *Saccharomyces/Ragi/Yeast*, menunjukkan bahwa perlakuan pemberian limbah kulit hasil fermentasi berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman dan jumlah anakan padi 5, 7, dan 9 MST, dan jumlah malai per rumpun, tetapi tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap tinggi tanaman dan jumlah anakan umur 3 MST, panjang malai, bobot gabah per rumpun (GKP), bobot 200 butir, bobot gabah per rumpun (GKG) dan bobot gabah per petak.

El Ghaouth dkk. (2003) dalam Kamila (2018) menyatakan bahwa khamir *S. cerevisiae* mampu menghasilkan etanol, enzim β -1,3-glukanase, kitinase, peroxidase, ethyl acetate, senyawa volatile yang bersifat anti jamur, toksin dan antibiotik. Enzim yang dihasilkan oleh khamir mampu mendegradasi dinding sel patogen dengan merangsang hidrolisis kandungan kitin yang merupakan komponen terbesar penyusun dinding sel cendawan (Chet dan Henis, 1975) dalam Kamila (2018).

2.1.6 Pupuk organik

Pupuk organik merupakan pupuk yang berasal dari tumbuhan mati, kotoran hewan dan/atau bagian hewan dan/atau limbah organik lainnya yang telah melalui proses rekayasa, berbentuk padat atau cair, dapat diperkaya dengan bahan mineral dan/atau mikroba yang bermanfaat untuk meningkatkan kandungan hara dan bahan organik tanah serta memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Permentan No. 70/ Permentan/SR.140/10/2011)

Pupuk organik bukan sebagai pengganti pupuk anorganik, tetapi sebagai komplementer. Kualitas pupuk organik yang dikomposkan sangat dipengaruhi oleh bahan dasarnya. Bahan dasar yang berasal dari sisa tanaman dapat dipastikan sedikit mengandung bahan berbahaya seperti logam berat (Pb, Cd, Hg, As, dan lain-lain) (Hartatik dan Setyorini, 2013).

Komposisi hara dalam pupuk organik sangat tergantung dari sumbernya. Menurut sumbernya, pupuk organik dapat diidentifikasi berasal dari kegiatan pertanian dan non pertanian. Dari pertanian dapat berupa sisa panen dan kotoran ternak, sedangkan dari non pertanian dapat berasal dari sampah organik kota, limbah industri, dan sebagainya (Tan, 1993 dalam Hartatik dan Setyorini, 2013).

Kotoran hewan yang berasal dari usahatani pertanian antara lain adalah ayam, sapi, kerbau, babi, dan kambing. Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan sangat bervariasi tergantung pada umur hewan, jumlah, dan jenis makanannya. Secara umum, kandungan hara dalam kotoran hewan lebih rendah dari pada pupuk kimia. (Hartatik dan Setyorini, 2013).

Kandungan unsur kimia dan logam berat dari limbah cair industri sangat bervariasi tergantung jenis industri. Limbah dari industri makanan relatif rendah logam beratnya, namun uji mutu tetap perlu dilakukan untuk menjamin kualitas limbah. Limbah dari peternakan mengandung sedikit logam berat sehingga dapat digunakan sebagai pupuk organik (Hartatik dan Setyorini, 2013).

Pupuk organik mempunyai kandungan hara yang rendah, maka bahan/pupuk organik memerlukan 15-25 kali lebih berat untuk menyediakan hara yang sama jumlahnya dengan hara yang disediakan dari pupuk kimia buatan. (Agus dan Widiyanto, 2004 dalam Hartatik dan Setyorini, 2013).

2.1.7 Peranan bahan organik

Berbeda dengan pupuk kimia buatan yang hanya menyediakan satu sampai beberapa jenis hara saja, pupuk organik mempunyai peran penting dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Meskipun kadar hara yang dikandung pupuk organik relatif rendah, namun peranan terhadap sifat kimia tanah jauh melebihi pupuk kimia buatan. (Hartatik dan Setyorini, 2013).

Pupuk kimia buatan hanya mampu menyediakan satu (pupuk tunggal) sampai beberapa jenis (pupuk majemuk) hara tanaman, namun tidak menyediakan senyawa karbon yang berfungsi memperbaiki sifat fisik dan biologi tanah. Dengan demikian penggunaan pupuk anorganik yang tidak diimbangi dengan pemberian pupuk organik dapat merusak struktur tanah dan mengurangi aktivitas biologi tanah (Hartatik, Husnain, dan Widowati, 2015).

Menurut Bot dan Benites (2005) dalam Hartatik dkk (2015), sebagai penyumbang unsur hara bagi tanah, bahan organik memiliki peranan kunci sebagai sumber makanan bagi tanaman dan mengadsorpsi serta menahan unsur hara dalam bentuk tersedia bagi tanaman. Pupuk organik dapat menyediakan bermacam hara makro dan mikro walaupun dalam ketersediaan yang sedikit. Komposisi fisika, kimia, dan biologi pupuk organik sangat bervariasi dan manfaatnya bagi tanaman tidak secara langsung terlihat, serta respon tanaman relatif lambat. Pupuk organik diperlukan dalam dosis yang relatif tinggi

Penggunaan pupuk kandang dapat memperbaiki kesuburan tanah dan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik, sehingga mempercepat pertumbuhan tanaman (Zainal, Nugroho, dan Suminarti, 2014). Seperti yang disampaikan oleh Melati (1990) dalam Zainal dkk. (2014), kandungan N, P, dan K dalam pupuk kandang tidak terlalu tinggi tetapi dapat memperbaiki permeabilitas tanah, porositas, struktur tanah, daya menahan air dan kandungan kation tanah. Salah satu jenis pupuk kandang yang dapat digunakan adalah pupuk kandang ayam. Berdasarkan hasil penelitian Melati (2005) dalam Zainal dkk. (2014), membuktikan bahwa pemberian pupuk kandang ayam sebanyak 20 t/ha dapat memberikan hasil tertinggi pada peubah : tinggi tanaman, indeks luas daun (ILD),

jumlah cabang, jumlah ruas, bobot kering akar, bobot kering tajuk, bobot polong panen/petak, dan bobot polong isi pada tanaman kedelai.

Hasil penelitian Zainal dkk. (2014), tanaman kedelai yang dipupuk kandang ayam dosis 15 t/ha yang dikombinasikan dengan berbagai level pemupukan N, menghasilkan komponen pertumbuhan (bobot segar akar dan jumlah cabang) maupun komponen hasil (jumlah polong per tanaman) paling tinggi. Tanaman yang dipupuk kandang ayam dosis 15 t/ha, menghasilkan bobot polong isi per tanaman, bobot 100 biji, dan hasil biji (ton/ha) paling tinggi, masing-masing sebesar 16,77 g/tan, 13,94 g/tan, dan 2,17 t/ha biji kering.

Menurut Sembiring dkk. (2013), peranan bahan organik yang terkandung dalam pupuk organik terhadap tanah adalah sebagai berikut :

1) Kesuburan Fisik Tanah

Membentuk agregat tanah yang berperan sebagai bahan perekat antar partikel tanah untuk bersatu menjadi agregat tanah. Mempermudah dalam mengolah tanah. Meningkatkan porositas tanah, yaitu bagian tanah yang terisi oleh udara dan air untuk dapat meningkatkan kemampuan menahan air dan memperbaiki aerasi dalam tanah. Aerasi tanah sering terkait dengan pernafasan mikroorganisme dalam tanah dan akar tanaman, karena aerasi terkait dengan O₂ dalam tanah. Dengan demikian aerasi tanah akan mempengaruhi populasi mikrobial dalam tanah. Menurunkan laju erosi tanah akibat dari perbaikan struktur tanah yaitu dengan mantapnya agregat tanah yang membuat tanah menjadi lebih tahan terhadap pukulan air hujan.

Agregasi tanah menciptakan lingkungan fisik yang baik untuk perkembangan akar tanaman melalui pengaruhnya terhadap porositas, aerasi, dan daya menahan air. Melalui agregat yang mantap dan baik, maka efisiensi pemupukan dapat terjadi karena kemampuan partikel tanah dalam memegang unsur hara lebih tinggi (KTK tanah lebih tinggi) (Sembiring dkk., 2013).

Agregat tanah yang mantap dan stabil penting bagi lahan pertanian dan perkebunan. Faktor yang mempengaruhi kemantapan agregat adalah pengolahan tanah, aktivitas mikroorganisme tanah, dan penutupan tajuk tanaman pada

permukaan tanah yang dapat menghindari splash erosi akibat curah hujan yang tinggi (Sembiring dkk, 2013).

2) Kesuburan Kimia Tanah

Pengaruh bahan organik terhadap kesuburan kimia tanah antara lain terhadap kapasitas pertukaran kation, kapasitas pertukaran anion, pH tanah, daya sangga tanah dan terhadap kekhilangan tanah. Fraksi organik dalam tanah berpotensi dapat berperan untuk menurunkan kandungan pestisida secara nonbiologis, yaitu dengan cara mengadsorpsi pestisida dalam tanah. Pengaruh penambahan bahan organik terhadap pH tanah dapat meningkatkan atau menurunkan tergantung oleh tingkat kematangan bahan organik yang kita tambahkan dan jenis tanahnya. Membantu proses mineralisasi perombakan bahan organik dalam tanah. Mineralisasi bahan organik akan menghasilkan sulfida yang berasal dari senyawa protein tanaman. Di dalam tanaman, senyawa sistein dan metionin merupakan asam amino penting yang mengandung sulfur penyusun protein (Mengel dan Kirkby, 1987 dalam Atinajo, 2003). Membantu ketersediaan fosfat bagi tanaman yang tersedia dari adanya bahan pelarut fosfat yaitu asam – asam organik hasil dekomposisi bahan organik.

3) Peranan Terhadap Biologi Tanah

Bahan organik merupakan sumber energi bagi makro dan mikro-fauna tanah. Penambahan bahan organik dalam tanah akan menyebabkan aktivitas dan populasi mikrobiologi dalam tanah meningkat, terutama yang berkaitan dengan aktivitas dekomposisi dan mineralisasi bahan organik. Beberapa mikroorganisme yang berperan dalam dekomposisi bahan organik adalah fungi, bakteri dan aktinomisetes. Di samping mikroorganisme tanah, fauna tanah juga berperan dalam dekomposisi bahan organik antara lain yang tergolong dalam protozoa, nematoda, Collembola, dan cacing tanah. Fauna tanah ini berperan dalam proses humifikasi dan mineralisasi atau pelepasan hara, bahkan ikut bertanggung jawab terhadap pemeliharaan struktur tanah (Tian, 1997 dalam Atinajo, 2003).

Mikro flora dan fauna tanah ini saling berinteraksi dengan kebutuhannya akan bahan organik, karena bahan organik menyediakan energi untuk tumbuh dan bahan organik memberikan karbon sebagai sumber energi. Pengaruh positif yang

lain dari penambahan bahan organik adalah pengaruhnya pada pertumbuhan tanaman. Terdapat senyawa yang mempunyai pengaruh terhadap aktivitas biologis yang ditemukan di dalam tanah adalah senyawa perangsang tumbuh (auxin), dan vitamin (Stevenson, 1982 dalam Atinojo, 2003). Senyawa-senyawa ini di dalam tanah berasal dari eksudat tanaman, pupuk kandang, kompos, sisa tanaman dan juga berasal dari hasil aktivitas mikrobia dalam tanah. Di samping itu, diindikasikan asam organik dengan berat molekul rendah, terutama bikarbonat (seperti suksinat, ciannamat, fumarat) hasil dekomposisi bahan organik, dalam konsentrasi rendah dapat mempunyai sifat seperti senyawa perangsang tumbuh, sehingga berpengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman.

Bahan organik mempunyai peranan penting sebagai bahan pemicu kesuburan tanah, baik secara langsung sebagai pemasok hara bagi organisme autotrof (tanaman) juga sebagai sumber energi bagi organisme heterotrof (fauna dan mikroorganisme tanah). Meningkatnya aktivitas biologi tanah akan mendorong terjadinya perbaikan kesuburan tanah, baik kesuburan fisik, kimia maupun biologi tanah. Perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah yang searah dengan kebutuhan tanaman (*plant requirement*) tanaman target akan mampu memperbaiki pertumbuhan dan produksi tanaman (Subowo, 2010). Di sisi lain, bahan organik dapat dimanfaatkan untuk menjerap logam berat, karena bahan organik mengandung gugus fungsional yang bila terionisasi dapat bersifat aktif dalam menjerap logam berat. Peningkatan konsentrasi gugus fungsional aktif ini menjadi lebih tinggi pada pH tinggi, sebab ionisasi hidrogen akan lebih mudah terjadi (Salam dkk, 1998 dalam Haryono, 2009).

Beberapa laporan lain juga menunjukkan bahwa bahan organik berkorelasi negatif dengan kelarutan logam berat di dalam tanah, karena kehadirannya meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah, sehingga secara tidak langsung meningkatkan penjerapan kation logam berat dan menekan gerakan logam berat di dalam tubuh tanah (Salam dkk, 1998 dalam Haryono, 2009).

2.2. Kerangka pemikiran

Salah satu upaya dalam meningkatkan produksi kacang kedelai adalah dengan cara ekstensifikasi lahan, yaitu pemanfaatan lahan marjinal terdampak pertambangan emas. Untuk dapat digunakan, maka lahan tersebut harus diberi asupan bahan organik dan mikroba pembenah tanah agar kedelai dapat tumbuh dengan baik. Penambahan bahan organik agar dapat memperbaiki kualitas tanah dan ketersediaan bahan organik dalam tanah merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman.

Bahan atau pupuk organik sangat bermanfaat bagi peningkatan produksi pertanian baik kualitas maupun kuantitas, mengurangi pencemaran lingkungan, dan meningkatkan kualitas lahan secara berkelanjutan. Penggunaan pupuk organik dalam jangka panjang dapat meningkatkan produktivitas lahan dan dapat mencegah degradasi lahan. Sumber bahan untuk pupuk organik sangat beranekaragam, dengan karakteristik fisik dan kandungan kimia/hara yang sangat beragam sehingga pengaruh dari penggunaan pupuk organik terhadap lahan dan tanaman dapat bervariasi.

Pupuk hayati adalah inokulan berbahan aktif organisme hidup atau laten dalam bentuk cair atau padat yang memiliki kemampuan untuk memobilisasi, memfasilitasi dan meningkatkan ketersediaan hara tidak tersedia (N_2 , hara terikat dalam mineral atau terikat dalam bentuk senyawa organik) menjadi bentuk tersedia melalui proses biologis. Dekomposer atau mikroba perombak dikategorikan sebagai pupuk hayati karena berperan aktif dalam mengubah hara tidak tersedia atau terikat dalam bentuk senyawa organik menjadi hara tersedia melalui proses mineralisasi atau dekomposisi (Simarmata dkk, 2012).

Menurut Hardjowigeno (1995) dalam Haryono dan Soemono (2009) bahan organik dapat memperbaiki struktur tanah sehingga akar dapat berkembang dengan baik; menambah kemampuan tanah untuk menahan air, meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan unsur-unsur hara sehingga tidak mudah tercuci; dan sebagai sumber energi bagi mikroorganismenya yang berperan dalam proses dekomposisi dan mineralisasi hara.

Kemampuan mikroba dalam pupuk hayati yang dapat dimanfaatkan sebagai bioakumulator merkuri (Hg) serta dapat digunakan sebagai agen bioremediasi atau *biofertilizer* pada lingkungan yang tercemar logam berat yang dapat memfiksasi N dari udara sehingga dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman seiring dengan kemampuan bahan organik menurut Stevenson (1994) dalam Ainun, Tjoa, Samudin (2013) membentuk senyawa kompleks (*Organo Metalic Complex*) yang dapat menurunkan konsentrasi ketersediaan logam serta penelitian yang dilakukan oleh Ainun dkk (2013), membuktikan bahwa bahan organik yang berasal dari kotoran ayam juga mampu mengkompleks metaloid seperti Hg dan meningkatkan pertumbuhan tanaman.

Hasil penelitian Mezuan, Handayani, dan Inorih (2002) menunjukkan bahwa kombinasi pemberian pupuk hayati dengan bahan organik memberikan pengaruh nyata terhadap bioaktivitas tanah dan stabilitas agregat pada budidaya padi gogo skala rumah kaca selama empat bulan.

Tetapi, pada umumnya penggunaan mikroorganisme masih terbatas pada satu jenis mikroba (*single effect*) dan efektivitasnya belum teruji pada lahan-lahan marginal (Handayani, 2001 dalam Mezuan dkk, 2002). Padahal aspek tersebut perlu diperhatikan karena efisiensi dan efektivitas mikroorganisme sebagai bahan aktif pupuk hayati dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis tanah, kondisi iklim dan kualitas bahan organik (Alexander, 1977; Handayani, 2001 dalam Mezuan dkk, 2002).

Berdasarkan hal tersebut, diharapkan adanya pengaruh pemberian pupuk hayati dengan majemuknya kandungan mikroba tanah yang diperlukan dan pupuk organik pada lahan marginal terdampak pertambangan emas terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai.

2.3. Hipotesis

Terjadi interaksi antara pemberian pupuk hayati dan pupuk organik terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kacang kedelai pada lahan terdampak pertambangan emas.