

BAB II

KAJIAN TEORI

A. Nutrisi Tanaman

Nutrisi tanaman adalah elemen penting yang diperlukan tanaman untuk pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi. Tiga unsur makro esensial yaitu nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) sangat diperlukan dalam jumlah besar untuk mendukung fungsi metabolisme, seperti fotosintesis, sintesis protein, dan pembentukan jaringan tanaman. Ketersediaan nutrisi di tanah sangat memengaruhi produktivitas tanaman. Namun, sering kali terjadi kehilangan nutrisi akibat pencucian, fiksasi tanah, atau volatilisasi, sehingga diperlukan teknologi untuk meningkatkan efisiensi serapan hara. Nutrisi tanaman merupakan unsur kimia yang penting untuk pertumbuhan dan reproduksi tanaman. Nutrisi tanaman dibedakan menjadi unsur esensial dan non esensial. Kriteria esensial berdasarkan tiga aspek yaitu: (1) Unsur tersebut harus dibutuhkan oleh tanaman untuk menyelesaikan siklus hidupnya; (2) Tidak ada unsur lain yang bisa menggantikan unsur tersebut; dan (3) Semua tanaman membutuhkan unsur tersebut. Nutrisi esensial pada tanaman dibedakan menjadi 3 macam berdasarkan tingkat kebutuhan tanaman akan unsur tersebut yaitu: (1) Nutrisi dasar, merupakan sekitar 96% dari total bahan kering tanaman dan secara umum tidak terjadi kekurangan unsur-unsur dasar tersebut bagi tanaman, terdiri atas: karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O); (2) Makronutrien, merupakan unsur hara esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang lebih besar (lebih dari 0,01% berat kering tanaman), terdiri atas: nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S); serta (3) Mikronutrien, merupakan unsur hara esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang lebih kecil (kurang dari 0,01% berat kering tanaman), terdiri atas: besi (Fe), seng (Zn), boron (B), tembaga (Cu), mangan (Mn), molibdenum (Mo), dan klorin (Cl) (Inaya *et al.*, 2021, hlm. 3).

B. Hidrogel

Hidrogel adalah polimer hidrofilik yang memiliki kemampuan menyerap dan menahan air dalam jumlah besar. Dalam bidang pertanian, hidrogel digunakan untuk meningkatkan kapasitas retensi air tanah dan mengatur pelepasan hara secara bertahap. Hidrogel dapat membantu mengurangi pencucian pupuk dan memastikan nutrisi tersedia sesuai kebutuhan tanaman, sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan dan hasil panen (Sari & Achmar, 2018, hlm. 5).

C. Pupuk NPK

Pupuk NPK adalah pupuk anorganik yang mengandung nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), yang masing-masing berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Nitrogen diperlukan untuk pembentukan daun, fosfor untuk pengembangan akar dan pembungaan, sedangkan kalium meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit dan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Oleh karena itu, formulasi pupuk dalam bentuk hidrogel menawarkan solusi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk (Simorangkir, 2023, hlm. 7).

1. Siklus Nitrogen (P)

Nitrogen adalah unsur esensial bagi pertumbuhan tanaman, khususnya dalam pembentukan protein, klorofil, dan asam nukleat. Siklusnya cukup kompleks karena melibatkan proses biologis, kimia, dan fisik.

- a) Fiksasi Nitrogen: Nitrogen bebas (N_2) di udara difiksasi menjadi bentuk amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+) oleh bakteri penambat N (misalnya *Rhizobium* pada akar leguminosa, atau *Azotobacter* bebas di tanah).
- b) Amonifikasi: Bahan organik (sisa tanaman/hewan) diuraikan mikroba menjadi amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+).
- c) Nitrifikasi: *Nitrosomonas* mengubah $NH_4^+ \rightarrow$ nitrit (NO_2^-). Kemudian *Nitrobacter* mengubah $NO_2^- \rightarrow$ nitrat (NO_3^-), bentuk yang mudah diserap tanaman.
- d) Denitrifikasi: Bakteri denitrifikasi (misalnya *Pseudomonas*) mengubah NO_3^- kembali ke N_2 yang dilepaskan ke atmosfer.

2. Siklus Fosfor (P)

Fosfor penting untuk energi (ATP), membran sel (fosfolipid), dan pembentukan DNA/RNA. Siklus fosfor berbeda dari nitrogen karena tidak memiliki fase gas.

- a) Sumber Fosfor: Fosfor berasal dari pelapukan batuan yang mengandung mineral fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).
- b) Larut dalam Tanah: Fosfat dilepaskan ke tanah dalam bentuk ion H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-} (tergantung pH).
- c) Penyerapan oleh Tanaman: Akar menyerap fosfat yang larut, seringkali dibantu oleh mikoriza yang meningkatkan penyerapan.
- d) Siklus Biotik: Tanaman $\rightarrow$ dimakan hewan $\rightarrow$ sisa organisme mati $\rightarrow$ diuraikan mikroba $\rightarrow$ fosfat kembali ke tanah.
- e) Sedimentasi: ebagian fosfor terbawa aliran air ke sungai/laut $\rightarrow$ mengendap menjadi batuan sedimen $\rightarrow$ proses geologi mengangkatnya lagi.

3. Siklus Kalium (K)

Kalium penting untuk aktivasi enzim, pengaturan osmotik, transportasi air, dan pembukaan stomata. Siklus kalium lebih sederhana dibanding nitrogen dan fosfor.

- a) Sumber Alami: Berasal dari pelapukan mineral kaya kalium, seperti feldspar atau mika.
- b) Bentuk dalam Tanah: Kalium larut (K^+) langsung tersedia untuk tanaman. Kalium terikat (exchangeable K) menempel di koloid tanah, bisa dilepas kembali. Kalium mineral (fixed K) terikat kuat dalam mineral tanah, lambat tersedia.
- c) Penyerapan Tanaman: Tanaman menyerap K^+ dari larutan tanah.
- d) Pengembalian ke Tanah: Saat tanaman mati atau melalui kotoran hewan, K kembali ke tanah, lalu mengalami pelapukan ulang.

D. Natrium Alginat

Natrium alginat adalah polisakarida alami berbentuk garam natrium dari asam alginat yang diperoleh dari dinding sel alga coklat seperti *Laminaria* dan *Macrocystis*. Senyawa ini larut dalam air membentuk larutan kental dan memiliki kemampuan membentuk gel melalui proses gelasi ionotropik, yaitu reaksi silang antara gugus karboksilat natrium alginat dengan ion divalen seperti CaCl_2 . Proses ini menghasilkan struktur gel stabil yang sangat berguna dalam berbagai aplikasi,

termasuk sistem penghantaran nutrisi berbasis hidrogel. Dalam bidang pertanian, natrium alginat digunakan untuk mengontrol pelepasan nutrisi dari pupuk secara bertahap, sehingga meningkatkan efisiensi serapan tanaman dan mengurangi kehilangan nutrisi akibat pencucian. Penggunaan natrium alginat dalam formulasi hidrogel pupuk NPK berpotensi meningkatkan pertumbuhan tanaman hortikultura seperti selada (*Lactuca sativa*) (Hermana *et al.*, 2015, hlm. 3).

E. Gelasi Ionotropik Eksternal

Gelasi ionotropik eksternal adalah metode pembentukan hidrogel melalui interaksi ionik antara polimer bermuatan negatif, seperti Natrium Alginat, dengan ion multivalen, yaitu CaCl_2 . Metode ini dilakukan dengan merendam larutan polimer dalam larutan ion pengikat, sehingga membentuk jaringan gel yang stabil. Teknik ini memungkinkan pelepasan hara secara terkendali dari hidrogel, yang sangat relevan untuk meningkatkan efisiensi pemupukan (Prihantini & Fidrianny, 2019, hlm 5).

F. Selada (*Lactuca sativa*)

Selada (*Lactuca sativa*) adalah tanaman hortikultura yang memiliki siklus pertumbuhan singkat dan responsif terhadap ketersediaan nutrisi. Tanaman ini membutuhkan pasokan nitrogen, fosfor, dan kalium yang memadai untuk menghasilkan daun yang berkualitas. Selada sering digunakan sebagai model tanaman dalam penelitian agronomi karena kemampuannya mencerminkan perubahan nutrisi dan efektivitas teknologi pemupukan (Purba, 2020, hlm. 4).



Gambar 2.1 Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.)

(Sumber: <http://repository.usu.ac.id>)

Adapun klasifikasi tanaman selada adalah sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta
Kelas	: Magnoliopsida
Ordo	: Asterales
Famili	: Asteraceae
Genus	: <i>Lactuca</i>
Spesies	: <i>Lactuca sativa</i> L.

G. Pelepasan Nutrisi

Pelepasan nutrisi secara terkendali adalah teknologi yang dirancang untuk menyediakan hara tanaman secara bertahap sesuai kebutuhan fisiologisnya. Hidrogel pupuk NPK memungkinkan pelepasan nutrisi berlangsung lambat dan merata, mengurangi pencucian hara ke lingkungan, serta meningkatkan efisiensi serapan nutrisi oleh tanaman (Yanuar & Widawati, 2014, hlm. 12). Teknologi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman tetapi juga mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan. Hidrogel berbasis Natrium Alginat dapat terurai oleh mikroorganisme tanah, yang mengurai struktur polimer menjadi komponen yang lebih sederhana, sehingga melepaskan nutrisi yang terkandung di dalamnya. Proses ini berlangsung lebih lambat, tetapi memberikan pasokan nutrisi yang stabil dan bertahap. Dengan kontrol terhadap struktur hidrogel dan kondisi lingkungan, pelepasan nutrisi dapat diprogram untuk berlangsung sesuai dengan kebutuhan tanaman, meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi kerugian nutrisi akibat pencucian atau pemborosan. (Jayanudin *et al.*, 2022, hlm. 6).

H. Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

NO.	Nama Peneliti	Judul	Tahun	Temuan
1.	Alessandro Sorze <i>et all</i>	Pengembangan Hidrogel Superabsorben Berbasis Natrium Alginat dan Serat Selulosa untuk Aplikasi Pertanian	2023	Penelitian ini mengembangkan komposit hidrogel berbasis Natrium Alginat dan serat selulosa yang dapat digunakan sebagai kondisioner tanah dan penutup permukaan tanah. Hidrogel ini menunjukkan sifat reologi, morfologi, dan kapasitas penyerapan air yang baik, serta meningkatkan retensi air dalam tanah, yang bermanfaat untuk pertumbuhan tanaman dan perlindungan hutan. Hidrogel memiliki struktur pori yang optimal, yang memungkinkan pelepasan air secara perlahan dan terkendali ke tanah.
2.	Sintia Lestari <i>et all</i>	Hidrogel Superabsorben Berbasis Natrium Alginat-Bentonit sebagai Pelapis Pupuk Lepas Lambat	2022	Penelitian ini berhasil mensintesis hidrogel superabsorben menggunakan natrium alginat dan bentonit dengan penambahan agen pengikat silang (crosslinker) CaCl_2 dan epiklorohidrin. Hidrogel ini dirancang sebagai pelapis pupuk lepas lambat (slow-

				release fertilizer). Hasil penelitian menunjukkan bahwa hidrogel dengan komposisi tertentu memiliki rasio pembengkakan (swelling ratio) yang tinggi, yaitu 3.428,52%, dan mampu melepaskan urea secara perlahan sebesar 4,67%. Pelepasan urea ini tidak dipengaruhi oleh perubahan pH, sehingga hidrogel ini berpotensi diaplikasikan pada berbagai karakteristik air tanah.
--	--	--	--	---

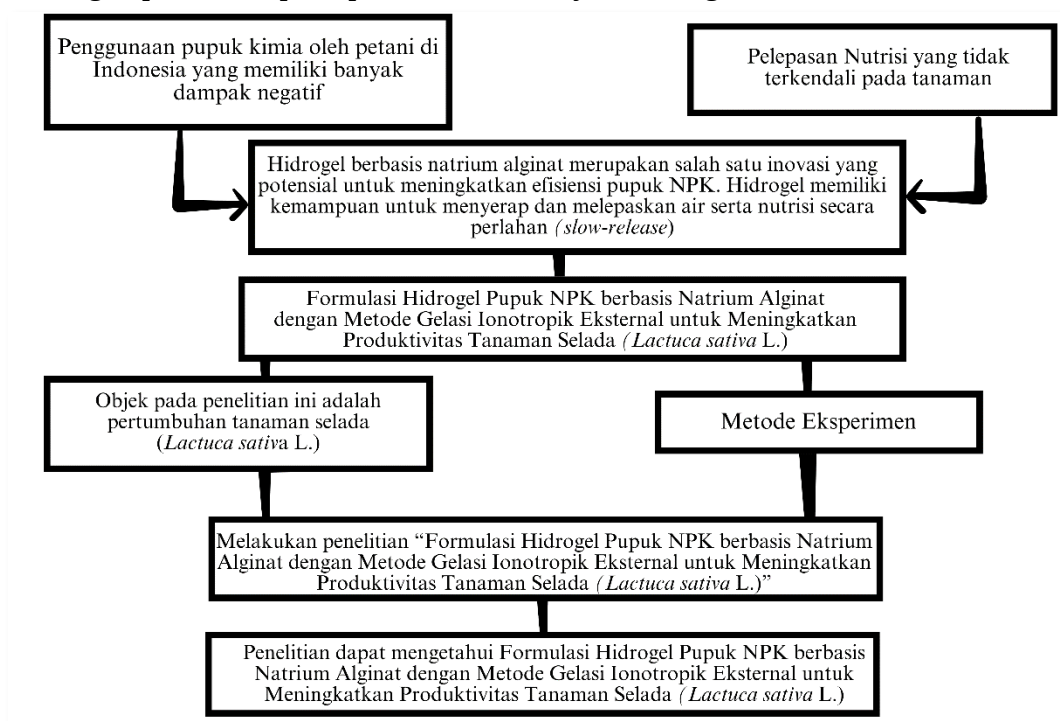
Penelitian yang relevan yang dilakukan oleh Alessandro Sorze *et al* pada tahun 2023 dengan judul “Pengembangan Hidrogel Superabsorben Berbasis Natrium Alginat dan Serat Selulosa untuk Aplikasi Pertanian”. Penelitian ini mengembangkan komposit hidrogel berbasis Natrium Alginat dan serat selulosa yang dapat digunakan sebagai kondisioner tanah dan penutup permukaan tanah. Hidrogel ini menunjukkan sifat reologi, morfologi, dan kapasitas penyerapan air yang baik, serta meningkatkan retensi air dalam tanah, yang bermanfaat untuk Pertumbuhan tanaman dan perlindungan hutan. Hidrogel memiliki struktur pori yang optimal, yang memungkinkan pelepasan air secara perlahan dan terkendali ke tanah.

Penelitian selanjutnya yang relevan yang dilakukan oleh Sintia Lestari *et al* pada tahun 2022 dengan judul “Hidrogel Superabsorben Berbasis Natrium Alginat-Bentonit sebagai Pelapis Pupuk Lepas Lambat”. Penelitian ini berhasil mensintesis hidrogel superabsorben menggunakan natrium alginat dan bentonit dengan penambahan agen pengikat silang (crosslinker) CaCl_2 dan epiklorohidrin. Hidrogel ini dirancang sebagai pelapis pupuk lepas lambat (slow-release fertilizer). Hasil penelitian menunjukkan bahwa hidrogel dengan komposisi tertentu memiliki rasio pembengkakan (swelling ratio) yang tinggi, yaitu 3.428,52%, dan mampu melepaskan urea secara perlahan sebesar 4,67%. Pelepasan urea ini tidak dipengaruhi oleh perubahan pH, sehingga hidrogel ini berpotensi diaplikasikan pada berbagai karakteristik air tanah.

I. Kerangka Pemikiran

Hidrogel adalah polimer hidrofilik dengan kemampuan menyerap dan melepaskan air secara bertahap, sehingga dapat digunakan untuk mengontrol pelepasan nutrisi dalam tanah. Penggunaan biopolimer alami seperti Natrium Alginat dalam formulasi hidrogel tidak hanya meningkatkan stabilitas struktur hidrogel tetapi juga lebih ramah lingkungan dibandingkan polimer sintetis. Dengan metode gelasi ionotropik eksternal, hidrogel dapat dibentuk melalui interaksi ionik antara polimer dan ion pengikat silang, sebagaimana dijelaskan metode ini menghasilkan hidrogel dengan porositas dan kapasitas pelepasan yang lebih optimal untuk aplikasi pertanian.

Efisiensi penggunaan pupuk merupakan faktor utama dalam meningkatkan produktivitas tanaman, ketersediaan hara yang sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman sangat menentukan hasil panen. Namun, pemupukan konvensional sering mengalami kehilangan nutrisi akibat pencucian dan volatilisasi. Oleh karena itu, penerapan hidrogel berbasis Natrium Alginat dengan metode gelasi ionotropik eksternal dalam penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan memberikan pelepasan nutrisi yang lebih terkontrol dan sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman selada (*Lactuca sativa* L.). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi inovatif dalam meningkatkan efisiensi pemupukan serta produktivitas tanaman secara lebih berkelanjutan. Kerangka pemikiran pada penelitian ini disajikan sebagai berikut.



J. Asumsi Dan Hipotesis

1. Asumsi

- a. Pupuk NPK mampu memberikan nutrisi sehingga mendukung pertumbuhan optimal pada tanaman.
- b. Konsentrasi pupuk NPK yang berbeda dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman bayam.

2. Hipotesis

- H₀ : Tidak adanya pengaruh Hidrogel pupuk NPK berbasis Natrium Alginat dengan metode gelasi ionotropik eksternal terhadap pertumbuhan tanaman selada.
- H₁ : Adanya pengaruh Hidrogel pupuk NPK berbasis Natrium Alginat dengan metode gelasi ionotropik eksternal terhadap pertumbuhan tanaman selada.

K. Analisis Pembelajaran

Penelitian mengenai formulasi hidrogel pupuk NPK berbasis Natrium Alginat dengan metode gelasi ionotropik eksternal untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) sangat relevan untuk dikenalkan kepada peserta didik tingkat SMA. Topik ini memperkenalkan pendekatan inovatif dan ramah lingkungan dalam bidang pertanian, yang sejalan dengan isu-isu global mengenai ketahanan pangan dan efisiensi pemanfaatan pupuk. Hasil penelitian ini dapat diintegrasikan dalam pembelajaran Biologi pada materi sistem ekologi atau perubahan lingkungan dalam Kurikulum Merdeka, khususnya pada Fase E kelas 10. Dalam fase ini, peserta didik diajak untuk mengenali dampak praktik manusia terhadap lingkungan dan mengeksplorasi solusi ilmiah atas permasalahan tersebut. Formulasi hidrogel sebagai pupuk berbasis biopolimer juga dapat dijadikan sebagai proyek pembelajaran dengan tema “Teknologi Ramah Lingkungan dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan”. Dengan demikian, siswa tidak hanya belajar konsep teoretis, tetapi juga diperkenalkan pada teknologi baru yang aplikatif dan berpotensi memberikan solusi terhadap masalah efisiensi pupuk dan kualitas pertumbuhan tanaman.

1. Keluasan dan Kedalaman Materi

Dalam Fase E kelas X, peserta didik diharapkan mampu memahami interaksi manusia dengan lingkungan, termasuk dampak penggunaan pupuk kimia dan potensi teknologi alternatif. Materi ini menyentuh topik-topik seperti daur biogeokimia, hubungan antara faktor abiotik dan pertumbuhan tanaman, serta konservasi sumber daya alam.

Hidrogel pupuk NPK dapat menjadi bahan ajar yang memperluas pemahaman siswa mengenai upaya peningkatan efisiensi pupuk sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Dengan memahami mekanisme pelepasan lambat pupuk melalui hidrogel dan peran Natrium Alginat sebagai biopolimer alami, siswa mendapatkan wawasan interdisipliner yang mengaitkan biologi, kimia, dan lingkungan.

2. Karakteristik dan Kedalaman Materi

Materi ini bersifat konkret dan aplikatif, sehingga siswa dapat melihat langsung dampaknya dalam konteks pertumbuhan tanaman. Dengan menyimulasikan atau melakukan proyek kecil tentang penggunaan hidrogel pupuk pada tanaman seperti selada, siswa dapat mengamati secara langsung bagaimana teknologi ini mempengaruhi efisiensi penyerapan unsur hara dan pertumbuhan tanaman. Kedalaman materi mencakup pemahaman ilmiah tentang struktur hidrogel, interaksi ionik dalam proses gelasi, dan bagaimana proses ini dapat dimanfaatkan untuk tujuan agrikultur. Hal ini menjadikan pembelajaran lebih bermakna karena melibatkan observasi nyata dan memungkinkan siswa berpikir kritis terhadap penerapan teknologi dalam pertanian.

3. Perubahan Perilaku Hasil Belajar

Dengan mempelajari materi ini, peserta didik diharapkan mengalami perubahan perilaku yang lebih sadar terhadap pentingnya teknologi ramah lingkungan dan penggunaan sumber daya secara efisien. Mereka akan lebih menghargai inovasi yang berorientasi pada keberlanjutan, dan terdorong untuk mendukung praktik pertanian yang tidak merusak lingkungan.

Pemahaman ini dapat membentuk sikap tanggung jawab terhadap lingkungan

dan mendorong minat siswa untuk mengeksplorasi lebih jauh bidang bioteknologi atau rekayasa lingkungan.

4. Bahan dan Media Pembelajaran

Media ajar yang cocok untuk topik ini mencakup video interaktif, artikel ilmiah populer, serta modul praktikum tentang cara pembuatan hidrogel sederhana. Selain itu, guru dapat memanfaatkan panduan eksperimen mini untuk simulasi pembuatan pupuk hidrogel skala kecil di laboratorium sekolah, menggunakan bahan pengganti seperti tepung tapioka atau gelatin sebagai ilustrasi konsep. Penggunaan visualisasi struktur kimia hidrogel dan animasi tentang pelepasan hara secara perlahan dari pupuk hidrogel akan membantu siswa memahami konsep yang abstrak menjadi lebih konkret.

5. Strategi Pembelajaran

Strategi yang dapat diterapkan adalah *Project-Based Learning* (PJBL). Pembelajaran dimulai dengan pemaparan masalah penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dan dampaknya terhadap lingkungan. Siswa kemudian diajak mengeksplorasi alternatif ramah lingkungan, seperti hidrogel berbasis Natrium Alginat. Guru membagi siswa dalam kelompok untuk melakukan studi literatur, merancang eksperimen, serta melakukan simulasi atau demonstrasi pembuatan pupuk hidrogel. Setiap kelompok dapat melakukan pengamatan pertumbuhan tanaman uji (misalnya selada) menggunakan media pupuk hidrogel buatan mereka. Hasil proyek disusun dalam laporan dan dipresentasikan sebagai bagian dari asesmen. Diskusi dan refleksi kelompok tentang manfaat, kendala, dan potensi aplikasi teknologi hidrogel akan memperkaya pemahaman dan mengembangkan soft skill siswa.

6. Sistem Evaluasi

Sistem evaluasi dalam pembelajaran ini dirancang secara holistik untuk menilai aspek kognitif, psikomotorik, afektif, serta kemampuan presentasi dan refleksi peserta didik. Aspek kognitif dievaluasi melalui tes tulis, kuis, dan diskusi untuk mengukur pemahaman konsep tentang hidrogel, pupuk NPK, dan pertanian berkelanjutan. Aspek psikomotorik dinilai melalui observasi langsung dalam praktikum pembuatan hidrogel dan pengamatan pertumbuhan tanaman, menilai keterampilan teknis serta penerapan prosedur ilmiah. Aspek

afektif meliputi penilaian terhadap sikap, tanggung jawab, kerjasama, dan kepedulian siswa terhadap lingkungan selama proses pembelajaran berlangsung. Selain itu, siswa juga dievaluasi berdasarkan kualitas laporan proyek dan kemampuan mereka dalam menyampaikan hasil melalui presentasi. Refleksi individu digunakan untuk menilai pemahaman kontekstual siswa terhadap pentingnya inovasi ramah lingkungan dalam pertanian modern. Evaluasi ini memastikan siswa tidak hanya menguasai teori, tetapi juga memiliki keterampilan, sikap, dan kesadaran yang mendalam terhadap peran ilmu pengetahuan dalam menyelesaikan masalah nyata.