BAB II
KAJIAN PUSTAKA

Bab II ini memaparkan kajian pustaka yang melandasi penelitian mengenai penerapan *E-Worksheet Project Based Learning* (PjBL) berbasis *Augmented Reality* (AR) pada pembelajaran biologi konsep serangga untuk meningkatkan kemampuan tanggap peserta didik dalam perencanaan penyelesaian masalah sebagai manifestasi indikator ke-4 *Digital Habits of Mind*. Kajian ini mencakup teori yang relevan dengan variabel penelitian, kajian materi biologi sebagai konteks, penelitian terdahulu, kerangka pemikiran, serta asumsi dan hipotesis penelitian.

A. Kajian Teori

1. E-Worksheet atau LKPD *Digital*

Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) atau *E-Worksheet* digital merupakan perangkat pembelajaran yang dirancang untuk mengarahkan aktivitas belajar peserta didik secara bertahap, memberi panduan kerja, dan menyediakan ruang respon aktif bagi mereka, terhadap tugas sains (Jamil et al., 2019). Pada penelitian yang dilakukan oleh Jamil tahun 2019 mengembangkan LKPD materi Arthropoda berbasis STEM berteknologi AR dan menemukan bahwa produk yang dikembangkan memenuhi kriteria sangat valid menurut ahli materi dan media, serta praktis digunakan guru di kelas, karena struktur langkahnya jelas dan mendorong siswa melakukan observasi, diskusi, dan refleksi.

Pada penelitian terkait tentang E-LKPD berbasis *STEM* menekankan bahwa perangkat pembelajaran digital yang baik harus memiliki kriteris: (1) memiliki validitas isi dan konstruk yang kuat, (2) praktis dan mudah dioperasikan oleh guru dan juga peserta didik, dan (3) menunjukkan indikasi keefektifan terhadap proses dan hasil belajar. *E-Worksheet digital* memungkinkan integrasi teks, gambar, video, tautan, dan objek AR dalam satu *platform* sehingga dapat mendukung pembelajaran interaktif dan mandiri. Dalam penelitian ini, *E-Worksheet* disusun sebagai LKPD digital interaktif yang memuat sintaks PjBL, menuntun peserta didik dari orientasi masalah

hingga refleksi, dan menyediakan ruang untuk menuliskan rencana penyelesaian masalah secara eksplisit. Kelayakan E-*Worksheet* kemudian dianalisis berdasarkan kriteria valid, praktis, dan juga efektif, dalam mengikuti prinsip pengembangan perangkat pembelajaran modern (Fitria, 2025; Jamil et al., 2019).

Seiring dengan perkembangan teknologi informasi dan komunikasi, LKPD mengalami transformasi dari bentuk cetak (konvensional) menjadi bentuk elektronik yang dikenal sebagai *Electronic Student Worksheet* atau *E-Worksheet* (E-LKPD). E-Worksheet didefinisikan sebagai lembar kerja yang disajikan secara digital melalui perangkat komputer, *tablet*, atau *smartphone*, yang dapat memuat berbagai elemen multimedia seperti teks, gambar, audio, video, animasi, hingga simulasi interaktif, sehingga penyajian materi menjadi lebih menarik dan kontekstual dibandingkan LKPD cetak (Arviansyah & Shagena, 2022). Lebih lanjut, E-Worksheet tidak hanya merupakan alih bentuk LKPD cetak ke dalam format digital, tetapi juga mengintegrasikan unsur interaktivitas yang memungkinkan peserta didik memberikan respons secara langsung melalui perangkat digital dan menerima umpan balik secara otomatis dari sistem (Sari et al., 2022). Dengan demikian, E-Worksheet memiliki peran ganda, yaitu sebagai media penyampaian materi sekaligus sebagai instrumen penilaian yang dapat memberikan informasi capaian belajar peserta didik secara langsung.

Secara umum, komponen yang terdapat dalam *E-Worksheet* tidak jauh berbeda dengan LKPD konvensional, namun dilengkapi dengan unsur digital dan interaktif. Komponen tersebut meliputi:

a) Judul dan identitas, memuat judul kegiatan, mata pelajaran, kelas, serta alokasi waktu pengerjaan;
b) Petunjuk belajar, berupa arahan mengenai cara mengerjakan E-Worksheet, baik dalam bentuk teks, audio, maupun video instruksi;
c) Tujuan/indikator pembelajaran, yang menjelaskan capaian kompetensi yang diharapkan setelah peserta didik menyelesaikan E-Worksheet;

d) Materi atau informasi pendukung, dapat berupa teks, gambar, tautan video, maupun media AR yang membantu peserta didik memahami konsep sebelum mengerjakan tugas;
e) Tugas dan latihan soal, terdiri atas berbagai jenis pertanyaan interaktif (pilihan ganda, esai, isian, menjodohkan, gambar, dan lain-lain); dan
f) Penilaian dan umpan balik, yang dapat ditampilkan secara otomatis oleh sistem setelah peserta didik menyelesaikan tugas (Sari et al., 2022; Arviansyah & Shagena, 2022).

Penggunaan E-Worksheet dalam pembelajaran memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan LKPD konvensional berbasis cetak. Berdasarkan kajian dari beberapa penelitian terkait, keunggulan tersebut antara lain:

a) Interaktif dan Menarik

E-Worksheet memungkinkan integrasi berbagai elemen multimedia, seperti gambar, audio, video, dan animasi, sehingga tampilan lembar kerja menjadi lebih menarik dan tidak monoton. Hal ini terbukti dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan peserta didik selama proses pembelajaran (Indraswati et al., 2023).

b) Praktis, Fleksibel, dan Hemat Sumber Daya

E-Worksheet dapat diakses kapan saja dan di mana saja melalui perangkat digital yang terhubung dengan internet, sehingga lebih fleksibel digunakan baik dalam pembelajaran di kelas, daring, maupun campuran (Sobri et al., 2023). Selain itu, penggunaan E-Worksheet mengurangi kebutuhan terhadap kertas, sehingga lebih hemat biaya dan ramah lingkungan dibandingkan LKPD cetak.

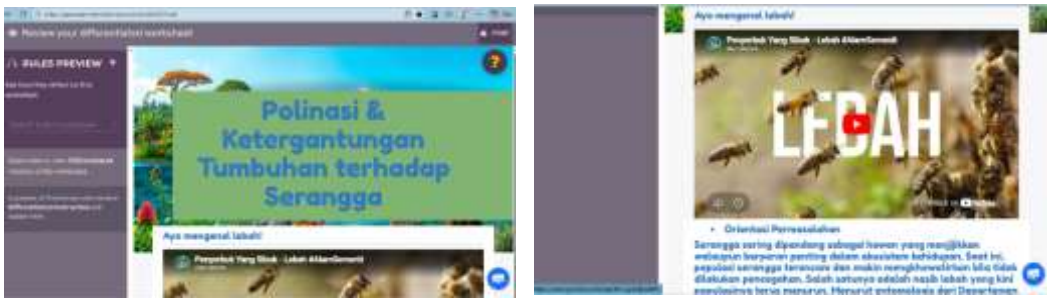
c) Penilaian dan Umpan Balik Otomatis

Salah satu keunggulan utama *E-Worksheet* adalah kemampuannya untuk memberikan penilaian dan umpan balik secara otomatis, khususnya untuk jenis soal objektif seperti pilihan ganda dan isian. Fitur ini memungkinkan peserta didik mengetahui hasil pekerjaannya secara langsung, sekaligus membantu guru memantau capaian belajar peserta didik secara efisien (Idyawati, Nurdin, & Nasir, 2022).

d) Mendukung Pembelajaran Berbasis Proyek dan Kolaboratif

E-Worksheet dapat dirancang untuk mengarahkan peserta didik melalui tahapan-tahapan pembelajaran berbasis proyek (PjBL), mulai dari identifikasi masalah, perencanaan, pelaksanaan, hingga evaluasi proyek, sehingga sangat sesuai diintegrasikan dengan model pembelajaran yang menuntut keterampilan kolaborasi dan pemecahan masalah (Septiana, Rizal, & Makiyah, 2023).

Wizer.me merupakan salah satu platform berbasis *website* yang dirancang khusus untuk membantu guru dalam membuat lembar kerja digital interaktif. Platform ini memungkinkan pendidik untuk menyusun *E-Worksheet* yang memuat berbagai jenis soal interaktif, gambar, audio, dan video, kemudian membagikannya kepada peserta didik secara daring (Kaliappen et al., 2021). Wizer.me dirancang untuk "menata ulang" konsep lembar kerja konvensional menjadi sebuah pengalaman belajar digital yang lebih dinamis, dengan fitur penilaian otomatis dan pemantauan perkembangan belajar peserta didik secara *real-time* (Sobri et al., 2023).



Gambar 2.1 *E-Worksheet* Berbasis Wizer.me

2. *Project Based Learning* (PjBL)

Project Based Learning (PjBL) merupakan model pembelajaran yang menempatkan proyek sebagai inti dari proses belajar, di mana peserta didik bekerja untuk menyelidiki masalah autentik, melakukan inkuiri, dan menghasilkan produk yang bermakna dalam jangka waktu tertentu (Triyanto et al., 2025). Kajian literatur PjBL dalam sains menunjukkan bahwa PjBL memiliki karakteristik utama: berpusat pada pertanyaan atau tantangan utama (*driving question*), berbasis masalah nyata, menuntut penyelidikan mendalam, melibatkan kolaborasi, dan berujung pada produk atau presentasi publik yang dapat dinilai .

Implementasinya, PjBL biasanya mengikuti sintaks: (1) orientasi masalah dan proyek, (2) perencanaan proyek, (3) pelaksanaan dan pemantauan, (4) penyusunan dan penyajian produk, serta (5) refleksi. Penelitian menunjukkan bahwa ketika sintaks ini dijalankan secara konsisten, PjBL mampu meningkatkan keterampilan proses sains, kreativitas, kemandirian belajar, dan kemampuan pemecahan masalah siswa dibandingkan model konvensional (Triyanto et al., 2025). Penelitian menunjukkan bahwa ketika sintaks ini dijalankan secara konsisten, PjBL mampu meningkatkan keterampilan proses sains, kreativitas, kemandirian belajar, dan kemampuan pemecahan masalah peserta didik dibandingkan model konvensional (Triyanto et al., 2025).

Konteks penelitian ini, PjBL menjadi landasan bagi penyusunan *E-Worksheet* dimana, setiap bagian lembar kerja dirancang untuk bisa memandu peserta didik melintasi tahapan tersebut, sehingga mereka terbiasa mengidentifikasi masalah, menyusun rencana, mengumpulkan data, dan merefleksikan efektivitas solusi yang diusulkan (Wijaya, 2024). Fokus analisis bukan hanya pada penguasaan konten, tetapi pada bagaimana langkah-langkah PjBL dalam lembar kerja benar-benar melatih peserta didik untuk merencanakan penyelesaian masalah secara sistematis. Sejalan dengan itu, kajian *sistematic literature network analysis* yang dilakukan oleh Hizqiyah et al. menunjukkan bahwa PjBL dalam pembelajaran biologi berkontribusi signifikan terhadap pengembangan *life skills* peserta didik, seperti kemampuan berpikir kritis, komunikasi, kolaborasi, dan manajemen diri yang menjadi tuntutan keterampilan abad ke-21 (Hizqiyah et al., 2023).

Keterkaitan antara sintaks PjBL dengan sub-indikator kemampuan tanggap yang diukur dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Keterkaitan Sintaks PjBL dengan Sub-Aspek Kemampuan Tanggap dalam Perencanaan Penyelesaian Masalah

Sintak PjBL	Aktivitas dalam E-Worksheet berbasis AR	Sub-Aspek Kemampuan Tanggap
Kegiatan 1 Menetapkan Pertanyaan / Masalah Utama	Peserta didik mengamati fenomena ekosistem dan morfologi serangga polinator melalui objek 3D AR (Sketchfab), lalu merumuskan pertanyaan/permasalahan utama (driving question).	Perumusan Solusi: identifikasi masalah

Sintak PjBL	Aktivitas dalam E-Worksheet berbasis AR	Sub-Aspek Kemampuan Tanggap
Kegiatan 2 Mendesain Perencanaan Proyek Implementasi	Peserta didik menyusun alternatif solusi, menentukan pembagian tugas, dan merancang jadwal pengerjaan proyek PPT interaktif.	Perumusan Solusi : penyusunan alternatif solusi
Kegiatan 3 Menyusun Jadwal Proyek	Peserta didik menyusun jadwal penyelesaian projek	Perumusan solusi
Kegiatan 4 Pengambilan Data & Validasi Lapangan	Peserta didik mengumpulkan data, berdiskusi tentang kelayakan solusi,	Evaluasi Solusi
Kegiatan 5 Memonitor Perkembangan	Peserta didik melakukan revisi rencana berbasis masukan kelompok.	Evaluasi Solusi
Kegiatan 6 Menguji Hasil & Evaluasi	Peserta didik menyusun PPT interaktif dan mempresentasikannya melalui Peer Group Assessment.	Perencanaan Implementasi
	Peserta didik merefleksikan efektivitas solusi dan proses kerja kelompok yang telah dilakukan.	Evaluasi Solusi & Perencanaan Implementasi (penguatan)

PjBL memiliki sejumlah keunggulan yang secara spesifik relevan untuk melatih dan mengukur kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah sebagai indikator ke-4 *Digital Habits of Mind*. Keunggulan-keunggulan tersebut antara lain:

a. Mendorong Penyelidikan Berbasis Masalah Autentik

PjBL menempatkan permasalahan nyata sebagai titik awal pembelajaran, sehingga peserta didik secara langsung berlatih untuk mengidentifikasi dan merumuskan solusi atas masalah yang relevan dengan kehidupan nyata. Zhang & Ma (2023) melalui meta-analisis komprehensif menunjukkan bahwa PjBL secara signifikan meningkatkan kemampuan pemecahan masalah peserta didik dibandingkan model konvensional, karena PjBL memaksa peserta didik untuk tidak hanya memahami konten, tetapi juga mengaplikasikannya dalam konteks penyelesaian masalah yang autentik.

b. Mengembangkan Life Skills dalam Biologi

Kajian *Systematic Literature Network Analysis* (SLNA) oleh Hizqiyah et al. (2023) yang menganalisis artikel-artikel dari Scopus menyimpulkan bahwa PjBL dalam pembelajaran biologi berkontribusi signifikan terhadap pengembangan *life skills* peserta didik, yaitu kemampuan berpikir kritis,

komunikasi, kolaborasi, dan manajemen diri yang menjadi tuntutan keterampilan abad ke-21. Kajian ini juga menemukan bahwa PjBL banyak diasosiasikan dengan pembelajaran berbasis *e-learning* dan *blended learning*, yang menunjukkan keterkaitan kuat antara PjBL dengan pemanfaatan teknologi digital dalam biologi yang relevan dengan penggunaan *E-Worksheet* berbasis AR dalam penelitian ini.

c. Memfasilitasi Kolaborasi dan Komunikasi

Struktur kerja kelompok dalam PjBL secara alami melatih peserta didik untuk berkolaborasi, mendistribusikan peran, dan mengomunikasikan ide-ide solusi kepada anggota kelompok. Husna et al. (2024) menegaskan bahwa PjBL terbukti mengembangkan kreativitas, kemampuan pemecahan masalah, kolaborasi, serta literasi digital peserta didik secara bersamaan, sehingga sangat sesuai untuk mengembangkan kemampuan tanggap yang membutuhkan kolaborasi dalam proses perumusan dan evaluasi solusi.

d. Menghasilkan Produk yang Dapat Dinilai

Salah satu keunggulan fundamental PjBL adalah keharusan menghasilkan produk nyata yang dapat dinilai, dalam penelitian ini berupa PPT interaktif yang dipresentasikan melalui *Peer Group Assessment*. Keharusan menghasilkan produk ini mendorong peserta didik untuk tidak berhenti pada tahap perumusan solusi, tetapi berlanjut hingga tahap perencanaan implementasi yang konkret, yang menjadi sub-indikator ketiga kemampuan tanggap yang diukur dalam penelitian ini (Kokotsaki et al., 2016).

e. Melatih Manajemen Diri dan Perencanaan

PjBL menuntut peserta didik untuk merencanakan langkah kerja, mengelola waktu, dan memantau progres proyek secara mandiri. Hizqiyah, Nurhadi, Widodo, dan Riandi (2019) menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis teknologi yang terstruktur, seperti web-based learning, dapat mengembangkan Habits of Mind termasuk kemampuan mengatur diri sendiri (self-regulation), yang merupakan prasyarat penting bagi kemampuan perencanaan implementasi.

3. Teknologi Visual *Augmented Reality* (AR)

Augmented Reality (AR) didefinisikan sebagai teknologi yang menampilkan objek virtual tiga dimensi (3D) yang terintegrasi dengan lingkungan nyata secara real time melalui perangkat seperti, *smartphone* atau tablet. Dalam pembelajaran biologi, AR banyak digunakan untuk memvisualisasikan konsep yang sulit diamati secara langsung, seperti struktur sel, organ, atau organisme kecil, sehingga siswa dapat melihat dan memanipulasi model 3D tersebut dari berbagai sudut. Meta-analisis yang dilakukan Setiawan et al. (2025) terhadap penelitian berbasis, AR dalam pembelajaran biologi ditahun 2016-2025, menunjukkan bahwasannya AR secara konsisten memberikan efek besar terhadap pemahaman konsep dan motivasi belajar siswa, terutama karena AR mendukung multi representasi (berupa teks, gambar, model 3D) dan pengalaman belajar yang imersif.

Penelitian (Jamil et al., 2019) pada LKPD Arthropoda berbasis STEM berteknologi AR menunjukan bahwa, AR ini dapat membuat objek Arthropoda yang kecil dan detail menjadi lebih mudah diamati dan dipahami, serta meningkatkan antusiasme siswa dalam belajar. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Tarigan & Adlini, 2024) dan (Utama & Margunayasa, 2024) juga melaporkan bahwa *Augmented Reality Based Student Worksheets* mampu meningkatkan hasil belajar dan keaktifan siswa karena lembar kerja tidak hanya meminta jawaban, tetapi mengajak siswa berinteraksi langsung dengan model AR yang disajikan, sebelum menganalisis dan menyimpulkan. Dalam penelitian ini, AR dimanfaatkan sebagai sarana visualisasi dan sumber data digital yang harus diinterpretasikan siswa ketika menyusun rencana penyelesaian masalah, sehingga perannya bukan sekadar memperindah tampilan, melainkan menjadi bagian integral dari proses berpikir dan pengambilan keputusan.

Dalam pembelajaran biologi, AR memungkinkan visualisasi objek-objek biologis dalam format 3D interaktif, memberikan pengalaman belajar yang lebih mendalam mengenai struktur dan fungsi organisme. Banyak konsep biologi yang tidak dapat sepenuhnya dipahami hanya melalui penjelasan verbal, deskripsi buku teks, atau ilustrasi dua dimensi (Handoko et al., 2024;

Reinke et al., 2021). AR hadir sebagai solusi atas keterbatasan ini, terutama untuk topik-topik yang membutuhkan pemahaman spasial, seperti morfologi serangga, anatomi sel, dan dinamika ekosistem. Penggunaan AR dalam pembelajaran dapat dijelaskan melalui beberapa teori belajar yang saling melengkapi, yaitu:

a. Teori Konstruktivisme

Vygotsky menyatakan bahwa peserta didik membangun pemahaman melalui interaksi aktif dengan lingkungannya. AR mengoperasionalkan prinsip ini dengan memungkinkan peserta didik merotasi, memperbesar, dan mengeksplorasi struktur biologis secara mandiri (Frontiers in Education, 2025).

b. *Cognitive Load Theory*

Sweller (1988) menyatakan bahwa pembelajaran meningkat ketika *extraneous cognitive load* berkurang. AR mengurangi efek split-attention dengan menempatkan teks dan diagram secara bersamaan dengan objek 3D, sehingga mendukung pemrosesan bermakna (*germane processing*) (Frontiers in Education, 2025).

c. *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML)

Mayer (2001) menyatakan bahwa pembelajaran lebih efektif ketika informasi disajikan melalui dua saluran sekaligus (verbal dan visual). AR secara alami mengintegrasikan informasi teks, audio, dan visual-3D dalam satu pengalaman tunggal yang kohesif, sehingga sangat sesuai dengan prinsip CTML.

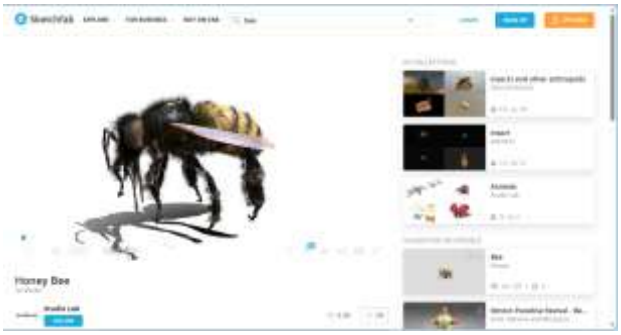
AR memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya pilihan yang tepat untuk diintegrasikan dalam pembelajaran biologi, khususnya pada materi serangga dan ekosistem. Keunggulan-keunggulan tersebut dirangkum pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Keunggulan *Augmented Reality* dalam Pembelajaran Biologi

Keunggulan AR	Ket.	Referensi
Visualisasi 3D Interaktif	AR memungkinkan peserta didik mengamati objek biologi (serangga polinator) secara tiga dimensi, diputar dari segala sudut, sehingga	Billinghurst & Duenser (2012); Frontiers in Education (2025)

Keunggulan AR	Ket.	Referensi
	pemahaman spasial dan struktural lebih mendalam.	
Meningkatkan Motivasi dan Keterlibatan	AR meningkatkan motivasi, prestasi belajar, dan emosi positif peserta didik dalam pembelajaran biologi.	Çetin & Türkan (2022); Frontiers (2025)
Mengurangi Beban Kognitif	AR menempatkan teks dan diagram secara bersamaan dengan objek, mengurangi split-attention dan mendukung pemrosesan bermakna.	Frontiers in Education (2025)
Aksesibilitas Tinggi via Perangkat Seluler	AR dapat diakses melalui smartphone/tablet tanpa perangkat tambahan, hemat biaya dan mudah digunakan di kelas.	Oktafiani et al. (2024); Omurtak & Zeybek (2022)
Relevan untuk Konsep Abstrak Biologi	Banyak konsep biologi (morfologi serangga, ekosistem) sulit dipahami dari gambar 2D. AR menghadirkan representasi nyata yang lebih konkret dan akurat.	Handoko et al. (2024); Reinke et al. (2021)

Sketchfab adalah platform digital berbasis *website* dan aplikasi seluler yang memungkinkan pengguna untuk mengunggah, menampilkan, dan berbagi model tiga dimensi (3D) secara interaktif di internet. Diluncurkan pada tahun 2012, Sketchfab kini menjadi salah satu platform terbesar di dunia untuk mempublikasikan dan menemukan model 3D secara daring, dengan komunitas jutaan kreator dari berbagai bidang, termasuk seni, arsitektur, sains, dan pendidikan (Sketchfab, 2025; Geniusfirms, 2025). Dalam konteks pendidikan, Sketchfab memungkinkan guru dan peserta didik untuk mengakses, mengeksplorasi, dan bahkan menampilkan model 3D secara *Augmented Reality* langsung melalui perangkat *smartphone* atau *tablet*, tanpa memerlukan perangkat tambahan yang mahal.



Gambar 2. 1 Sketcfab 3D

Laubscher et al. (2025) menjelaskan bahwa Sketchfab dipilih sebagai platform AR dalam penelitian biologi karena kemampuannya merender model

3D ke dalam format yang kompatibel dengan kemampuan AR dari berbagai



perangkat genggam, termasuk ponsel dan tablet.

Gambar 2. 2 *Augmented Reality* lebah dalam Sketcfab 3D

Penggunaan perangkat genggam untuk AR melalui Sketchfab juga dinilai lebih hemat biaya dibandingkan perangkat AR khusus, dan lebih mudah diakses oleh peserta didik. Selain itu, Sketchfab telah digunakan secara luas oleh para profesor biologi untuk menyematkan model anatomi ke dalam pelajaran daring (Geniusfirms, 2025), menunjukkan relevansi dan keandalan platform ini dalam konteks pembelajaran sains. Dalam penelitian ini, objek serangga utama adalah *Apis mellifera* (lebah madu barat) yang divisualisasikan melalui model 3D berbasis AR pada platform Sketcfab. Visualisasi 3D melalui AR memungkinkan peserta didik mengamati detail morfologi yang tidak mungkin terlihat pada gambar 2D buku teks.

Kajian sistematis mengenai tren riset AR dalam pembelajaran biologi (2020–2024) menunjukkan bahwa AR terbukti meningkatkan motivasi, hasil belajar, dan kolaborasi peserta didik di berbagai jenjang pendidikan (*Systematic Review* AR Biologi, 2024). Lebih lanjut, meta-analisis terbaru dari 17 studi (2020–2024) menyimpulkan bahwa AR memberikan dampak positif yang signifikan pada prestasi belajar biologi di semua jenjang pendidikan (Meta-analisis AR Biologi, 2025).

Penelitian terbaru juga mengungkap bahwa *AR-enhanced instruction* pada biologi taksonomi menggunakan model 3D serangga yang diakses melalui Sketchfab terbukti menghasilkan peningkatan pengetahuan yang signifikan dibandingkan instruksi menggunakan gambar 2D (Laubscher et al., 2025), yang secara langsung mendukung pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini.

4. *Digital Habits of Mind* (sub- Indikator ke 3 indikator ke-4)

Digital Habits of Mind menurut Costa dan Kallick adalah disposisi atau kebiasaan berpikir yang mencerminkan cara seseorang bertindak cerdas ketika berhadapan dengan masalah yang jawabannya tidak langsung tersedia. Dalam era digital, kerangka ini diadaptasi menjadi *Digital Habits of Mind*, yaitu kebiasaan berpikir yang memandu peserta didik untuk menggunakan teknologi dan informasi digital secara kritis, etis, dan strategis dalam memecahkan masalah. *Digital Habits of Mind dapat* dipahami sebagai kecenderungan atau kebiasaan peserta didik untuk berpikir secara kritis, reflektif, dan bertanggung jawab ketika berinteraksi dengan informasi digital dalam rangka menyelesaikan masalah pembelajaran (Hizqiyah et al., 2022). Selain itu pada penelitian (Nurmeidina et al., 2025) menemukan bahwa *Habits of Mind* berkorelasi positif dengan kemampuan pemecahan masalah dalam pembelajaran matematika daring; siswa dengan tingkat *Habits of Mind* yang lebih baik cenderung lebih terampil dalam memahami masalah, merencanakan strategi, dan mengevaluasi solusi yang mereka pilih. Dalam penelitian ini, indikator ke-4 *Digital Habits of Mind* difokuskan pada aspek "tanggap dalam merencanakan penyelesaian masalah", yang dimaknai sebagai kebiasaan siswa untuk cepat merespons masalah berbasis informasi digital, memilih data relevan, serta mengorganisasi langkah pemecahan masalah secara runtut dan logis (Nurmeidina et al., 2025).

Konteks pendidikan sains dan biologi, Hizqiyah et al. (2018) menegaskan bahwa *Habits of Mind* merupakan kemampuan yang harus dimiliki oleh calon guru biologi, khususnya dalam penyelesaian masalah (*problem solving*). Kajian tersebut juga menunjukkan bahwa HoM dapat dilatih secara terstruktur melalui berbagai aktivitas pembelajaran yang menuntut peserta didik berpikir secara sistematis dan reflektif. Lebih jauh pada penelitian Hizqiyah, Widodo, Sriyati, dan Setiawan (2019) memetakan profil HoM guru biologi di SMA berdasarkan tiga komponen utama, yaitu berpikir kritis, berpikir kreatif, dan pengaturan diri (*self-regulation*), yang seluruhnya relevan dengan indikator kemampuan tanggap yang dikaji dalam penelitian

Penelitian ini berfokus pada pengembangan Indikator ke-4 DHoM, yaitu *Responsive* atau Kemampuan Tanggap dalam Perencanan Penyelesaian Masalah, yang dalam konteks pembelajaran dimanifestasikan melalui kemampuan peserta didik dalam merencanakan penyelesaian masalah secara sistematis dan berbasis data/bukti, khususnya dalam konteks permasalahan ekosistem dan peran serangga polinator.

5. Kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah

Kemampuan pemecahan masalah dalam pendidikan sains secara klasik dijelaskan mengikuti beberapa tahapan Polya: (1) memahami masalah, (2) merencanakan penyelesaian, (3) melaksanakan rencana, dan (4) mengevaluasi hasil. Penelitian Yulanda dan kolega (2023) menunjukkan bahwa banyak siswa mengalami kesulitan pada fase kedua dan ketiga, yakni merancang dan menjalankan rencana, meskipun mereka mampu memahami teks masalah dan mengenali informasi yang diberikan. Hal serupa ditemukan dalam kajian kemampuan pemecahan masalah IPA yang menunjukkan bahwa siswa cenderung lompat langsung ke jawaban tanpa menyusun rencana yang jelas, sehingga solusi yang dihasilkan sering tidak runtut dan kurang tepat.

Literatur PjBL menyebutkan bahwa model ini efektif untuk melatih kemampuan perencanaan karena siswa berulang kali dihadapkan pada tugas menyusun rencana kerja proyek, membagi peran, menentukan data yang perlu dikumpulkan, dan menyesuaikan rencana ketika menemukan informasi baru (Triyanto et al., 2025). Dalam penelitian ini, kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah didefinisikan sebagai kemampuan siswa untuk dengan cepat namun terarah berpindah dari pemahaman masalah menuju penyusunan rencana penyelesaian yang sistematis, meliputi: penentuan tujuan, urutan langkah kerja, data/informasi yang diperlukan, serta prediksi hasil atau dampak (Nurmeidina et al., 2025). Kemampuan ini diukur melalui rubrik yang menilai kecepatan respon, kejelasan dan kelengkapan rencana, relevansi data yang dipilih, dan kemampuan merevisi rencana berdasarkan informasi baru yang diperoleh selama proses proyek.

Berdasarkan acuan *Digital Habits of Mind* kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah merupakan salah satu bentuk konkret dari

indikator ke-4 *Digital Habits of Mind* yang dikembangkan dalam penelitian ini. Howell (2012) menyatakan bahwa individu yang responsif dalam konteks digital mampu mengenali permasalahan secara tepat, menilai urgensinya, menyusun alternatif solusi, mengevaluasi kelayakan solusi tersebut, serta merancang langkah-langkah implementasinya secara sistematis dan terarah. Kemampuan ini bukan sekadar kemampuan teknis dalam mengoperasikan teknologi, melainkan merupakan kemampuan berpikir tingkat tinggi yang melibatkan proses kognitif kompleks.

Dalam penelitian ini, kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah dioperasionalisasikan ke dalam tiga sub-indikator utama yang saling berkaitan, yaitu:

a. Sub-Indikator 1: Perumusan Solusi

Perumusan solusi merupakan kemampuan peserta didik untuk mengidentifikasi permasalahan secara tepat dan menyusun berbagai alternatif solusi yang relevan berdasarkan data dan informasi yang diperoleh selama proses pembelajaran. Costa & Kallick (2009) menyatakan bahwa individu yang memiliki *Habits of Mind* yang kuat akan secara aktif mencari dan mempertimbangkan berbagai perspektif sebelum memutuskan tindakan yang akan diambil. Dalam konteks penelitian ini, kemampuan perumusan solusi dilatih melalui tahap orientasi masalah dan perencanaan proyek dalam sintaks PjBL, di mana peserta didik mengidentifikasi permasalahan ekosistem yang diamati melalui objek 3D serangga polinator berbasis AR, lalu menyusun berbagai alternatif solusi yang mungkin diterapkan.

Kemampuan peserta didik untuk mengembangkan beberapa solusi untuk masalah yang diidentifikasi, termasuk langkah-langkah implementasi (Dweck, C.S, 2006) merupakan indikator penilaian dalam sub indikator Perumusan Masalah Sub-indikator lainnya perumusan solusi mencakup kemampuan: (1) mengidentifikasi akar masalah secara tepat dari fenomena yang diamati; (2) menyusun minimal dua alternatif solusi yang relevan dan didukung oleh data; serta (3) menjelaskan rasionalitas dari setiap alternatif solusi yang diusulkan berdasarkan informasi yang diperoleh dari eksplorasi *E-Worksheet*.

b. Sub-Indikator 2: Evaluasi Solusi

Evaluasi solusi merupakan kemampuan peserta didik untuk menilai kelayakan, kekuatan, dan kelemahan dari alternatif-alternatif solusi yang telah dirumuskan, kemudian memilih solusi terbaik berdasarkan pertimbangan yang rasional dan berbasis bukti. Menurut Costa & Kallick (2009), kemampuan berpikir fleksibel dan kemampuan berpikir tentang berpikir (*thinking about thinking/metacognition*) merupakan dua indikator *Habits of Mind* yang mendasari kemampuan evaluatif ini, karena evaluasi solusi menuntut peserta didik untuk tidak hanya menilai solusi dari satu sudut pandang, tetapi juga mempertimbangkan dampak jangka panjang, kendala potensial, dan relevansinya dengan konteks permasalahan yang ada.

Sub- Indikator ini ditunjukan dengan kemunculan Kemampuan Peserta Didik untuk mengevaluasi potensi keberhasilan dan risiko dari solusi yang diusulkan (Anderson, J. R. 1996). Dengan sub-indikator evaluasi solusi mencakup kemampuan: (1) menilai kelayakan setiap alternatif solusi menggunakan kriteria yang jelas; (2) mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan dari masing-masing alternatif solusi; dan (3) memberikan rekomendasi solusi terpilih yang disertai argumentasi yang logis dan berbasis data hasil eksplorasi AR.

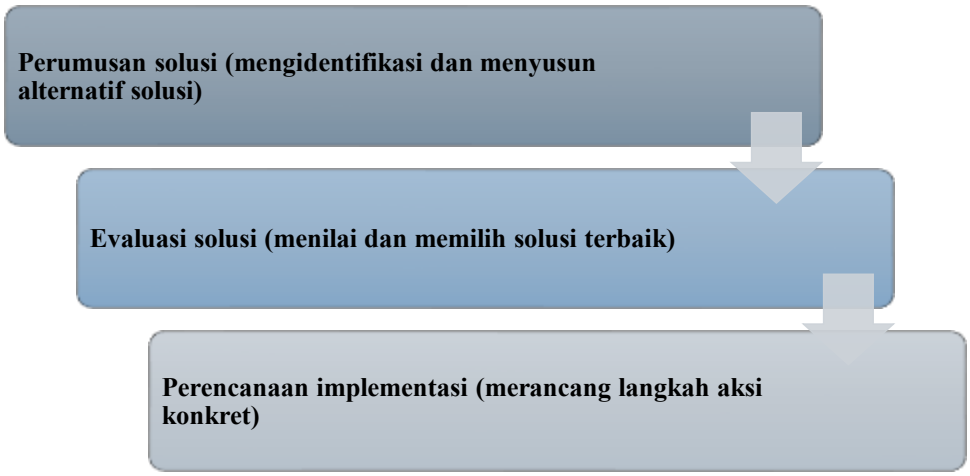
c. Sub-Indikator 3: Perencanaan Implementasi

Perencanaan implementasi merupakan kemampuan peserta didik untuk menyusun langkah-langkah penerapan solusi yang telah dipilih secara sistematis, realistis, dan terukur. Howell (2012) menegaskan bahwa kemampuan merespons secara responsif dalam konteks digital tidak cukup hanya pada tahap merumuskan dan memilih solusi, tetapi harus berlanjut hingga mampu merancang tahapan aksi yang konkret dan dapat diimplementasikan. Kemampuan ini berkaitan erat dengan keterampilan manajemen proyek yang menjadi salah satu kompetensi utama abad ke-21. Aspek penilaian dalam Sub-Indikator 3: Perencanaan Implementasi dinilai dengan kemampuan peserta didik untuk membuat rencana implementasi yang detail, termasuk *timeline,* sumber daya yang diperlukan, dan metode evaluasi keberhasilan (Kotter, J.P. 1996).

Sub-indikator perencanaan implementasi mencakup kemampuan: (1) menyusun langkah-langkah implementasi solusi secara berurutan dan logis; (2) mengidentifikasi sumber daya yang dibutuhkan dalam implementasi; (3) memprediksi kendala yang mungkin dihadapi beserta strategi antisipasinya; dan (4) menuangkan rencana implementasi ke dalam produk yang dapat dikomunikasikan, dalam penelitian ini berupa PPT interaktif yang dipresentasikan melalui *Peer Group Assessment*.

Ketiga sub-indikator tersebut tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan satu kesatuan proses yang mencerminkan kemampuan tanggap secara utuh.

Gambar 2. 3 Alur Keterkaitan sub-Indikator dalam Kemampuan



Tanggap

Alur kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah bergerak secara sistematis seperti pada gambar: Alur ini selaras dengan siklus pemecahan masalah berbasis teknologi yang menjadi inti dari indikator ke-4 *Digital Habits of Mind* (Howell, 2012).

Hizqiyah, Nurhadi, Widodo, dan Riandi (2019) menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis teknologi web (*web-based learning*) dapat secara efektif mengembangkan *Habits of Mind* peserta didik, dan temuan ini relevan dengan penelitian ini yang mengintegrasikan E-Worksheet berbasis AR sebagai medium teknologi digital untuk melatih ketiga sub-indikator kemampuan tanggap tersebut.

6. Pembelajaran Biologi Konsep Serangga Dalam Konteks Ekosistem

Dalam kurikulum biologi SMA, serangga (*Insecta*) diperkenalkan sebagai salah satu kelas dalam filum Arthropoda yang memiliki keanekaragaman morfologi, perilaku, dan relung ekologis yang sangat tinggi (Riset, 2022). Pada ranah ekologi, serangga dapat berperan sebagai herbivor, predator, parasit, polinator, dekomposer, dan bioindikator, sehingga keberadaan dan perubahan populasinya serangga dapat sangat memengaruhi keseimbangan rantai makanan, jaring-jaring makanan, dan stabilitas ekosistem. Serangga (Kelas Insecta) merupakan kelompok hewan beruas-ruas (Arthropoda) yang paling beragam dan paling banyak jumlah spesiesnya di bumi, mencakup lebih dari satu juta spesies yang telah teridentifikasi. Dalam konteks ekosistem, serangga menempati berbagai peran ekologis yang vital, mulai dari konsumen primer, dekomposer, predator, hingga agen penyerbukan (polinator). Khususnya kelompok serangga polinator, seperti lebah madu, kumbang, kupu-kupu, dan lalat, memiliki peran yang tidak tergantikan dalam mendukung reproduksi tumbuhan berbunga dan menjaga keseimbangan ekosistem (Hizqiyah et al., 2023).

Konsep serangga dalam pembelajaran biologi di sekolah menengah, khususnya kelas X, terintegrasi erat dengan materi ekosistem. Pembelajaran yang dirancang dengan baik mengenai peran serangga polinator dapat melatih peserta didik untuk tidak sekadar menghafal klasifikasi dan morfologi, tetapi juga menganalisis dampak perubahan lingkungan terhadap populasi polinator dan merancang solusi inovatif berbasis pengetahuan ekologi (Zubaidah, 2019). Dalam konteks pembelajaran berbasis masalah, penurunan populasi serangga pollinator, akibat aktivitas manusia maupun alam, dan hilangnnya habitat menjadi konteks autentik. Hal ini menjadikan konsep serangga sebagai konteks yang sangat relevan untuk mengembangkan kemampuan pemecahan masalah dan tanggap dalam perencanaan, khususnya dalam kerangka *Digital Habits of Mind* yang menjadi fokus penelitian ini.

Pengembangan bahan ajar biologi yang mengintegrasikan materi keanekaragaman organisme dengan ekosistem menunjukkan bahwa ketika

peserta didik diajak untuk dapat menganalisis kasusnya misalnya; penurunan populasi serangga penyerbuk atau ledakan hama pada suatu agroekosistem, maka mereka lebih terlatih mengidentifikasi hubungan antar komponen ekosistem, menganalisis sebab-akibat ekologis, dan merumuskan alternatif solusi konservasi atau pengendalian hayati (Sanchia & Faizah, 2022).

Dari perspektif konstruktivisme, pembelajaran konsep serangga yang dikaitkan dengan ekosistem seharusnya tidak berhenti pada hafalan ciri morfologi dan klasifikasi, tetapi mengajak peserta didik untuk mengonstruksi sendiri pemahaman tentang peran serangga melalui observasi, analisis data, dan pemecahan masalah berbasis situasi nyata (Triyanto et al., 2025). Kegiatan seperti memetakan posisi serangga dalam jaring-jaring makanan, mensimulasikan dampak hilangnya satu jenis serangga terhadap kestabilan ekosistem, atau mengkaji serangga sebagai bioindikator pencemaran dapat menjadi konteks autentik untuk melatih kemampuan berpikir ilmiah dan perencanaan penyelesaian masalah.

a. Materi Entomologi terapan yang terintegrasi Ekosistem

POLINASI DAN KETERGANTUNGAN TUMBUHAN TERHADAP SERANGGA

1. Jenis – jenis penyerbukan

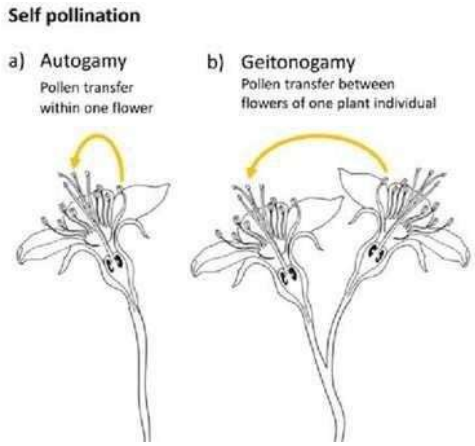
Berdasarkan sumber serbuk sarinya atau asal bunga tempat serbuk sari berasal. Penyerbukan dibedakan menjadi beberapa jenis:

a) Penyerbukan sendiri (autogamy)

Penyerbukan adalah mekanisme penyerbukan di mana serbuk sari jatuh ke kepala putik bunga itu sendiri. Proses ini terjadi pada bunga yang memiliki kedua alat kelamin jantan (benang sari) dan betina (putik) dalam satu bunga yang sama, sering disebut sebagai bunga sempurna. Secara teoritis, autogami mempromosikan homozigositas dan stabilitas genetik dalam suatu populasi, memastikan bahwa sifat-sifat yang telah beradaptasi dengan baik dapat diwariskan secara konsisten kepada generasi berikutnya tanpa introduksi variasi genetik baru dari luar. Karena tidak melibatkan bunga lain, keturunannya cenderung memiliki sifat genetik yang seragam dengan induknya.

b) Penyerbukan tetangga (geitonogami)

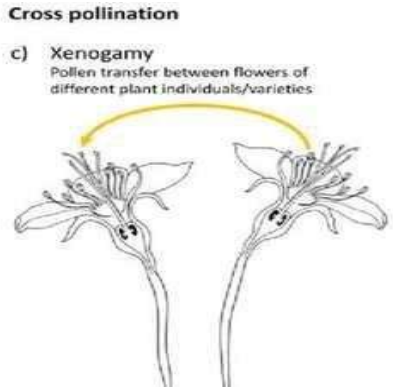
Penyerbukan tetangga terjadi ketika serbuk sari berasal dari bunga lain, tetapi masih dalam satu individu tumbuhan yang sama. Artinya, serbuk sari berpindah dari satu bunga ke bunga lain dalam satu tanaman. Walaupun terjadi antar-bunga, karena masih satu tanaman, sifat genetiknya tidak jauh berbeda dari penyerbukan sendiri.



Gambar 2. 4 Penyerbukan Sendiri (Autogami)
(Sumber: Klein, 2020).

c) Penyerbukan silang (xenogami/allogami)

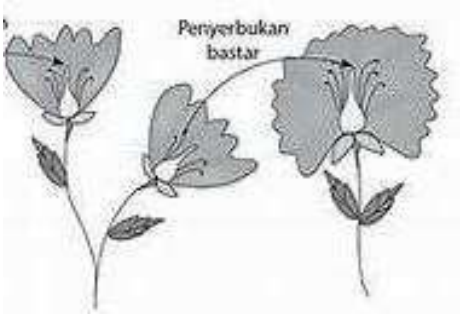
Penyerbukan silang merupakan penyerbukan yang melibatkan dua individu tanaman yang berbeda tetapi masih dalam satu spesies. Serbuk sari dari tanaman pertama jatuh ke kepala putik tanaman kedua. Penyerbukan ini menghasilkan keturunan dengan variasi genetik yang lebih tinggi, sehingga sangat penting dalam proses evolusi dan adaptasi tanaman. Penyerbukan silang sering dibantu oleh perantara seperti angin, serangga, burung, atau manusia. Secara teoritis, peningkatan variasi genetik melalui penyerbukan silang sangat penting dalam proses evolusi karena memungkinkan populasi tanaman untuk beradaptasi lebih baik terhadap perubahan lingkungan dan tekanan seleksi. Penyerbukan silang sering dibantu oleh perantara seperti angin, serangga, burung, atau bahkan manusia.



Gambar 2. 5 Penyerbukan Silang (Cross polination)
(Sumber: Klein, 2020)

d) Penyerbukan bastar (hibridogami)

Penyerbukan bastar adalah penyerbukan yang melibatkan dua tanaman berbeda varietas, jenis, atau spesies yang masih berkerabat dekat. Penyerbukan ini sering dilakukan secara buatan oleh manusia dalam program pemuliaan tanaman. Tujuannya adalah untuk menghasilkan keturunan baru dengan sifat-sifat unggul dari kedua induknya, seperti daya tahan terhadap penyakit, hasil panen tinggi, atau kualitas buah yang lebih baik. Hibridogami dapat menghasilkan keturunan dengan performa superior.



Gambar 2. 6 Penyerbukan Bastar (Hibridogami)
(Sumber: kibrispdr.org)

2. Jenis Penyerbukan Berdasarkan Perantaranya

a) Anemofili

Anemofili adalah jenis penyerbukan yang mengandalkan angin sebagai perantara utama. Tanaman yang melakukan anemofili umumnya menghasilkan serbuk sari yang ringan dan berjumlah banyak sebagai adaptasi untuk penyebaran yang efisien, dan bunga-bunga ini cenderung tidak

berwarna mencolok serta tidak berbau karena tidak perlu menarik hewan penyerbuk. Secara teoritis, adaptasi morfologi ini merupakan bentuk optimalisasi energi, mengalihkan sumber daya dari daya tarik visual atau aroma ke produksi serbuk sari massal dan struktur yang memfasilitasi dispersi pasif.



Gambar 2. 7 Anemofili
(Sumber: www.pendidiksumedang.com)

b) Entomofili

Penyerbukan yang dibantu oleh serangga polinator seperti lebah (Apis sp) , kupu-kupu (Junonia sp), dan kumbang sawit (Elaeidobius sp). Bunga biasanya berwarna cerah, beraroma wangi, dan menghasilkan nektar untuk menarik serangga. Serangga-serangga ini membawa serbuk sari dari satu bunga ke bunga lain, membantu proses reproduksi tanaman.

c) Ornitofili

Penyerbukan yang dibantu oleh burung, terutama burung pemakan nektar seperti kolibri. Bunga biasanya berwarna cerah (merah/oranye), menghasilkan banyak nektar, dan berbentuk memanjang untuk menyesuaikan dengan paruh burung. Burung kolibri (Trochilidae) adalah contoh umum burung ornitofili yang membantu penyerbukan tanaman.



Gambar 2. 8 Ornitofili
(Sumber: generacionverde.com)

d) Kiropterofili

Penyerbukan yang dibantu oleh kelelawar. Bunga jenis ini umumnya mekar pada malam hari, berwarna pucat, beraroma kuat, dan menghasilkan nektar dalam jumlah besar. Kiropterofili yang dibantu oleh kelelawar, seperti yang terjadi pada tanaman durian (Durio zibethinus) di mana kelelawar buah berperan penting. Kelelawar yang berperan sebagai penyerbuk biasanya adalah kelelawar buah (famili Pteropodidae) yang memakan nektar dan serbuk sari.



Gambar 2. 9 Kiropterofili
(Sumber: https://npcweb.org)

e) Malakofili

Penyerbukan yang dibantu oleh siput atau moluska dan biasanya terjadi di habitat lembap atau rawa. Bunga biasanya rendah dan dekat permukaan tanah. Salah satu kelompok tumbuhan melakukan malakofili adalah beberapa spesies dari famili Araceae, yang mencakup tanaman seperti talas-talasan.



Gambar 2. 10 Malakofili
(Sumber: Wikipedia)

f) Hidrofili

Hidrofili adalah jenis penyerbukan yang dibantu oleh air, dan umumnya terjadi pada tumbuhan air. Dalam proses ini, serbuk sari mengapung dan terbawa oleh arus air menuju putik. Mekanisme ini merupakan adaptasi

evolusioner krusial bagi tumbuhan akuatik, memungkinkan reproduksi di lingkungan di mana penyerbuk lain seperti angin atau serangga tidak efektif.

g) Antropofili

Penyerbukan yang dilakukan oleh manusia, sering dilakukan pada tanaman yang sulit diserbuki secara alami. Penyerbukan ini biasanya dilakukan secara manual dalam pertanian atau budidaya.

3. Lebah madu (*Apis Manifera*)

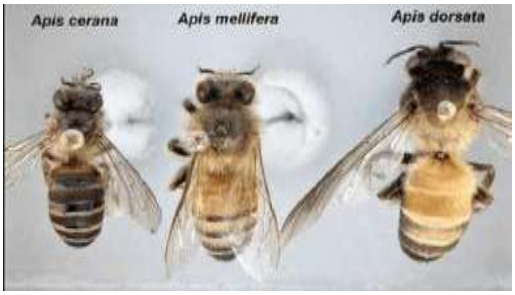
Apis mellifera, atau lebah madu barat, berasal dari Eropa, Asia Barat, dan Afrika. Spesies ini sengaja diperkenalkan ke berbagai belahan dunia sejak abad ke-17 melalui intervensi manusia, terutama karena produktivitas madunya yang tinggi, perilaku yang relatif jinak, dan kemampuannya beradaptasi dengan beragam iklim. Kini, Apis mellifera telah tersebar luas secara global, termasuk di Asia Timur, Australia, serta Amerika Utara dan Selatan, bahkan menjadi tulang punggung industri perlebahan modern. Habitat alaminya mencakup wilayah tropis dan terestrial seperti padang pasir, sabana, semak belukar, hutan, dan rawa. Kemampuan adaptasinya yang luar biasa memungkinkan lebah ini berkembang di lingkungan buatan manusia, seperti lahan pertanian, perkotaan, dan pinggiran kota. Faktor-faktor inilah yang menjadikan Apis mellifera sebagai model ideal untuk studi lebah madu, meskipun bukan spesies asli Asia seperti *Apis cerana*.

Tabel 2.3 Klasifikasi *Apis Mellifera*

Kingdom : Animalia (Hewan)
Filum : Arthropoda
Kelas : Insecta (Serangga
Ordo : Hymenoptera (bersayap selaput)
Famili : Apidae (Famili lebah)
Genus : *Apis*
Spesies : *Apis mellifera* (Lebah Madu Barat)



Gambar 2. 11 *Apis melliferra*
(Sumber: Vereecken et al., 2022)



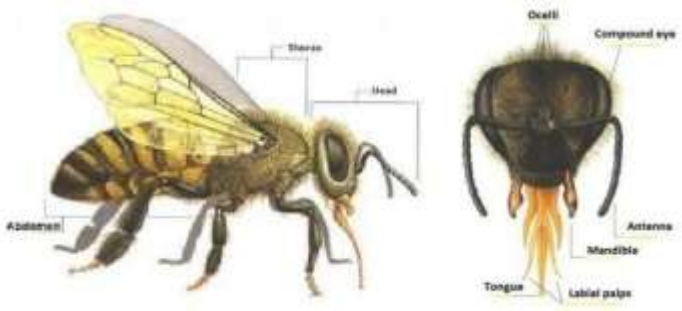
Gambar 2. 12 tiga Contoh Lebah Genus Apis
(Sumber: Bees4life)

Secara fisik, *Apis mellifera* umumnya berwarna merah atau coklat dengan pita hitam dan cincin oranye-kuning pada perut, memiliki rambut pada dada dan sedikit rambut di perut, serta keranjang serbuk sari di kaki belakangnya yang berwarna coklat tua hingga hitam. Terdapat dua kasta betina, yaitu pekerja mandul berukuran 10–15 mm dan ratu subur yang lebih besar, 18–20 mm. Lebah jantan (*drone*) berukuran 15–17 mm dan memiliki mata jauh lebih besar dari betina, yang diduga membantu mereka menemukan ratu saat penerbangan kawin. Lebah pekerja memiliki sayap yang lebih panjang dari drone meskipun tubuhnya lebih kecil.

Apis mellifera memiliki 26 sub-spesies yang dibedakan berdasarkan morfologi dan karakter molekuler, seperti toleransi iklim, perilaku, panjang lidah, dan warna tubuh. Lebah madu bersifat sebagian endotermik dan dapat menghangatkan tubuh serta sarangnya melalui gerakan otot terbang. Sarang dibangun dari lilin yang disekresikan, tempat ratu meletakkan telur. Perkembangan telur optimal pada suhu 33 36°C dan mengikuti metamorfosis sempurna: telur, larva, pupa, dan dewasa. Jenis makanan menentukan kasta betina. Fase pupa berlangsung 7–8 hari (ratu), 12 hari (pekerja), dan 14–15 hari (jantan). Umur ratu 2–5 tahun, pekerja 2–4 minggu (musim panas) atau hingga 11 bulan (musim dingin), dan jantan 4–8 minggu.

4. Morfologi *Apis mellifera*

Tubuhnya terdiri dari tiga bagian utama: kepala, dada (toraks), dan perut (abdomen). Struktur Tubuh Lebah dan Bagian Kepala



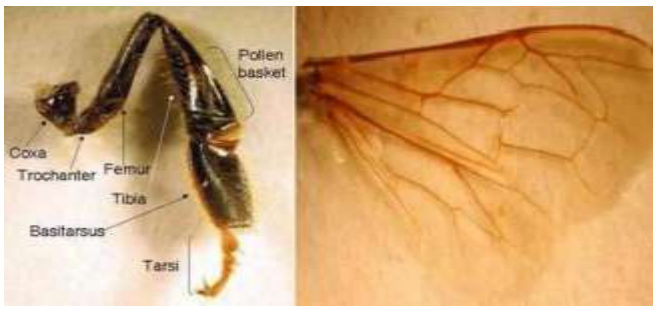
Gambar 2. 13 Morfologi Apis mellifera
(Sumber: abejas.org/bees-external-anatomy/)

a) Kepala

Kepala Apis mellifera memiliki organ sensorik dan mulut. Terdapat dua mata majemuk untuk penglihatan luas dan deteksi cahaya ultraviolet, serta tiga ocelli untuk mendeteksi intensitas cahaya. Antena berjumlah dua dan berfungsi sebagai alat penciuman serta peraba. Mulutnya terdiri dari mandibula untuk menggigit dan membentuk lilin, serta proboscis panjang untuk mengisap nektar.

b) Toraks

Toraks merupakan pusat pergerakan. Terdapat tiga pasang kaki dan dua pasang sayap transparan yang kuat. Kaki belakang lebah pekerja dilengkapi dengan struktur khusus seperti keranjang serbuk sari (corbicula), sisir serbuk sari, dan sikat kaki, yang digunakan untuk mengumpulkan dan membawa serbuk sari kembali ke sarang. Sayap depan lebih besar dari sayap belakang dan terhubung melalui kait kecil (hamuli), memungkinkan koordinasi saat terbang.

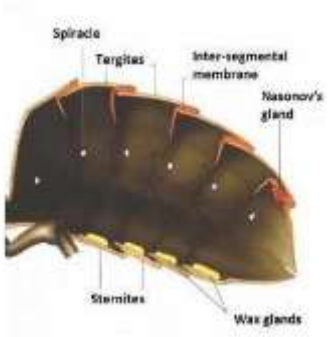


Gambar 2. 14 Kaki Belakang Sayap sepasang
(Sumber: abejas.org/bees-external-anatomy/)

c) Abdomen

Abdomen lebah madu tersusun atas 9 segmen, namun hanya 6 yang terlihat pada lebah betina dan 7 pada lebah jantan. Setiap segmen abdomen

memiliki dua lempengan: lempengan punggung disebut tergit, sedangkan lempengan perut disebut sternit. Keduanya dihubungkan oleh membran fleksibel yang memungkinkan berbagai gerakan, seperti memanjang, memendek, atau melengkung ke segala arah. Membran antar-segmen pada sternit cenderung lemah dan menjadi titik masuk bagi tungau *Varroa destructor* untuk menghisap hemolimfa lebah. Pada setiap tergit, terdapat lubang-lubang kecil yang disebut spirakel, tempat udara masuk ke dalam tubuh serangga. Abdomen lebah juga ditutupi oleh rambut-rambut halus.



Gambar 2. 15 Organ Internal Abdomen Apis mellifera
(Sumber: abejas.org/bees-external-anatomy/)

Panjang rambut ini, bersama dengan warna segmen, merupakan indikator yang digunakan untuk mengidentifikasi berbagai jenis ras lebah. Di dalam abdomen lebah, terdapat beberapa organ penting, yaitu kelenjar lilin, kelenjar Nasonov, dan sistem pertahanan yang mencakup sengat.

5. Dinamika Koloni Dan Perilaku Lebah Madu

Reproduksi pada lebah madu dipusatkan pada ratu (queen) yang kawin sekali dengan beberapa jantan (male) dan menyimpan sperma seumur hidup. Ia dapat bertelur hingga 1.000 butir per hari. Telur yang dibuahi menjadi betina (pekerja atau ratu), sedangkan yang tidak dibuahi menjadi jantan. Koloni baru terbentuk melalui perilaku “berkerumun”, di mana ratu lama pergi membawa separuh pekerja untuk mendirikan koloni baru. Di sarang lama, ratu-ratu baru akan bertarung hingga hanya satu yang tersisa. Jika koloni kehilangan ratu, beberapa pekerja akan mulai bertelur, meskipun hanya menghasilkan jantan karena telurnya tidak dibuahi. Perilaku sosial lebah madu menunjukkan eusosialitas tinggi, dengan pembagian tugas

berdasarkan usia (polietisme usia). Pekerja muda (*worker*) membersihkan sel, memberi makan larva, dan menjaga sarang. Pada usia tiga minggu, mereka mulai mencari makan. Komunikasi lebah madu terutama menggunakan feromon, getaran, dan tarian.

Tarian goyang digunakan untuk menginformasikan lokasi sumber makanan, dan mereka juga mampu mengenali arah dan jarak berdasarkan posisi matahari. Lebah madu memiliki penglihatan ultraviolet, mampu mendeteksi cahaya terpolarisasi, dan menggunakan kemampuan ini untuk navigasi serta mengenali bunga (Sherman dan Visscher, 2002).



Gambar 2. 16 Eusosialitas pada Lebah
(Sumber: abejas.org/*bees-external-anatomy*/)

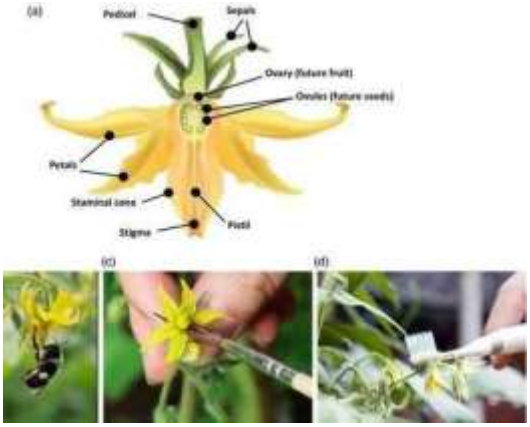
6. Proses Penyerbukan Oleh Lebah

Penyerbukan adalah bagian yang cukup penting dari proses reproduksi tumbuhan berbiji (Dingley et al., 2022). Proses penyerbukan didominasi oleh serangga terutama lebah yang mana hampir semua spesies lebah adalah penyerbuk. Lebih dari 90 persen jenis tanaman terkemuka dunia dikunjungi oleh lebah dan sekitar 30 persen oleh lalat, sementara masing-masing taksa lainnya mengunjungi kurang dari 6 persen jenis tanaman (IPBES, 2016). Produksi buah tomat, kelapa sawit, buah naga sangat bergantung pada penyerbuk yang efektif. Bunga tomat terdiri dari empat kelopak (sepal), diikuti oleh mahkota (kelopak), kemudian *androecium* (benang sari) dan *gynoecium* terdalam (putik dan karpel).

Penyerbukan biasanya tidak terjadi sampai kelopak bunga terbuka sepenuhnya (fase mekar), karena pada tahap inilah bagian-bagian

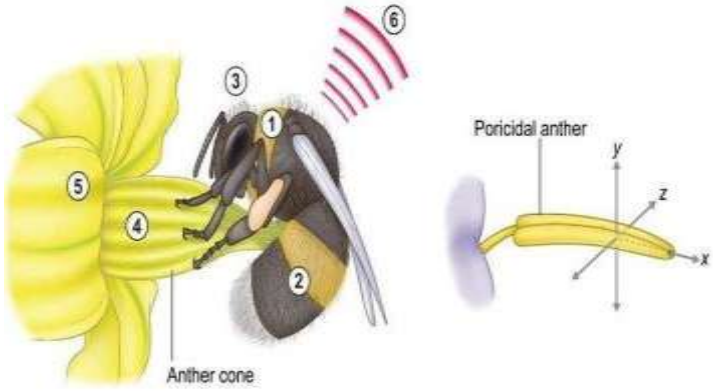
reproduktif bunga, yaitu benang sari (anther) dan putik (stigma), mulai terekspos dan aktif secara fungsional.

Meskipun tomat sering dianggap dapat melakukan penyerbukan sendiri karena bunga memiliki organ jantan dan betina, adanya getaran atau pergerakan yang dihasilkan oleh lebah (buzz pollination) yang secara signifikan meningkatkan efisiensi pelepasan serbuk sari. Faktor-faktor lingkungan dan ketersediaan polinator yang tepat menjadi krusial untuk memastikan tingkat set buah yang optimal dan kualitas hasil panen.



Gambar 2. 17 Struktur Bunga Tomat dan Polinasi
(Sumber: Singh et al., 2025)

Peran serangga penyerbuk, bahkan pada tanaman yang dapat menyerbuk sendiri, sering kali meningkatkan produktivitas dan viabilitas biji. Setelah serbuk sari menempel pada stigma, tabung serbuk sari tumbuh ke bawah stilus ke dalam ovarium, di mana ovula dibuahi menjadi biji dan ovarium bertransisi menjadi buah (Dingley et al., 2022). Lebah melakukan penyerbukan dengan menggetarkan bunga yang menghasilkan suara ‘buzz’ (bergetar) (Vallejo-Marín, 2019), perilaku lebah menghasilkan getaran saat mengumpulkan serbuk sari dari bunga sering disebut sonikasi (Cardinal et al., 2018). Menurut Vallejo-Marín (2019) suara merupakan hasil dari getaran lebah yang tidak berkontribusi pada ekstraksi serbuk sari.



Gambar 2. 18 Getaran Lebah saat Polinasi
(Sumber: Pesaresi et al)

Ilustrasi getaran yang dihasilkan oleh lebah yang mengunjungi bunga;

- Gambar kiri: diagram lebah yang menggetarkan kerucut kepala sari (berwarna kuning) dari bunga mirip *Solanum* dengan kepala sari *poricidal.*
- Gambar sebelah kanan: diagram yang menunjukkan satu kepala sari (berwarna kuning) dan tiga sumbu getaran (x, y, z). (1) Getaran ini ditransmisikan ke *anthercone* (4) melalui kontak langsung dengan dada, kepala, perut dan, pada tingkat lebih rendah, kaki (1-3). Getaran juga ditransmisikan ke bagian lain dari bunga termasuk kelopak dan sepal (5). Lebah yang bergetar juga mentransfer energi ke udara sekitar yang menghasilkan komponen yang dapat didengar.

7. Jenis tanaman bunga yang bergantung pada penyerbukan

a) Bunga kakao



Gambar 2. 19 Bunga Kakao Theobroma cacao
(Sumber: Wikipedia)

Tanaman kakao umumnya menyerbuk silang, meskipun ada yang bisa menyerbuk sendiri. Penyerbukan alami terhambat karena struktur bunga tertutup dan serbuk sarinya lengket, sehingga tidak efektif jika hanya mengandalkan angin atau air. Penyerbuk utama kakao adalah serangga Forcipomyia spp., yang efektif karena tubuh berbulu, thorax lebar, dan perilakunya yang sering menyentuh bagian bunga yang penting untuk penyerbukan.

b) Tanaman nanas

Tanaman nanas (*Ananas comosus (L.) Merr*.) merupakan salah satu jenis tanaman yang tidak bisa melakukan penyerbukan sendiri atau autogami (Wati, 2019). Penyerbukan sendiri atau autogami adalah suatu proses menempelnya serbuk sari dari suatu bunga pada kepala putik atau dengan kata lain bahwa penyerbukan ini terjadi jika serbuk sari dan putik berasal dari satu bunga itu sendiri (Rizki, 2020). Bunga pada tanaman nanas bergantung pada serangga sebagai polinator. Dengan kata lain bahwa kualitas buah nanas sangat ditentukan dari jumlah kunjungan dan penyerbukan yang dilakukan oleh serangga polinator (Suprianto et al., 2020).

c) Pohon Apel

Pohon apel merupakan jenis yang tidak bisa melakukan penyerbukan sendiri. Bunga apel tergantung pada serangga kanopi yang berperan sebagai polinator. Kualitas buah apel sangat ditentukan dari jumlah kunjungan dan penyerbukan yang dilakukan oleh polinator (Kevan & Phillips, 2001). Peranan serangga dalam penyerbukan tumbuhan telah banyak dilaporkan. Pada tanaman apel *(Malus sylvestris Mill*) di Jepang, lebah *Osmia cornifrons* sebagai penyerbuk, lebah Bombus terrestris dan Apis mellifera merupakan penyerbuk sebagian besar tanaman pertanian (Amano et al., 2000)

8. Ketergantungan Tanaman Terhadap *Apis Melifera*

Makanan bagi mahkluk hidup merupakan sumber energi yang dibutuhkan tubuh untuk aktifitas sehari-hari dan kelangsungan hidup. Bagian tanaman yang menjadi makanan bagi lebah yaitu cairan manis yang disebut dengan nektar, selain nektar terdapat tepung sari atau polen yang terdapat

pada tanaman dan bunga- bunga (Nasution et al, 2019). Lebah dan tanaman berbunga memiliki hubungan yang saling menguntungkan yaitu tanaman sebagai penyedia makanan lebah berupa nektar dan polen sedangkan lebah melakukan proses polinasi tanaman tersebut (Alpian et al, 2022). Tidak semua jenis tanaman disukai oleh lebah madu nektar dan polen merupakan pengikat primer bagi lebah untuk datang pada suatu tanaman. Sedangkan, sifat-sifat tanaman yang terlihat dari luar seperti warna bunga, aroma bunga dan bentuk bunga merupakan pengikat sekunder karena hanya menimbulkan rangsangan pada alat inderanya (Yanto et al. 2016). Bunga Marigold (*Tagetes spp*) memiliki aroma kuat yang sering digunakan untuk mengusir hama, termasuk beberapa jenis serangga. Aroma ini juga dapat membuat lebah kurang tertarik pada nektarnya. Tanaman herbal seperti kemangi juga memiliki aroma yang kuat yang tidak disukai oleh lebah dan tawon, sehingga dapat berfungsi sebagai pengusir alami. Namun, perlu dicatat bahwa saat kemangi berbunga, lebah mungkin masih tertarik pada bunganya. Ketersediaan pakan yang memenuhi syarat memainkan peranan penting guna menjamin tingkat produksi dan kualitas produk yang dihasilkan. Setiawan et al. (2016), menyatakan bahwa Kelangkaan sumber pakan berakibat fatal karena antara lebah dan tanaman terdapat ketergantungan yang sangat tinggi dan saling menguntungkan satu dengan lainnya. Berikut ini jenis tanamannya:

1) Bunga Matahari Kompatibilitas merupakan bentuk ketidaksuburan fisiologis yang menghambat pembuahan meskipun serbuk sari dan putik dalam kondisi normal (Nettacourt, 1977). Untuk mengatasi hambatan tersebut, keberadaan serangga penyerbuk sangat penting dalam membantu proses pembuahan agar terbentuk biji yang berkualitas (Cholid, 2014). Salah satu polinator utama adalah lebah madu, yang berperan penting dalam penyerbukan bunga matahari. Lebah madu biasanya aktif pada suhu optimal sekitar 20°C–25°C dan kelembaban 65%– 75% (Puskadija et al., 2007).



Gambar 2. 20 Bunga Matahari
(Sumber: www.kibrispdr.org)

2) *Acacia mangium*, merupakan spesies tanaman akasia yang dapat mengeluarkan titisan nektar di dekat tangkai pangkal daun dan hampir semua pangkal daun akasia mengeluarkan nektar sepanjang tahun sehingga dapat menjadi sumber nektar yang sangat potensial dan berkelanjutan bagi lebah (Rahmad et al., 2021). Penelitian yang dilakukan oleh Adgaba et al., (2016) menyatakan nektar dari tanaman akasia nektar yang potensial sebagai sumber pakan lebah madu di Arab Saudi.



Gambar 2. 21 *Acacia mangium*
(Sumber: nparks-gov-sg.)

3) Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*), diidentifikasi sebagai salah satu sumber pakan lebah madu yang potensial. Sawit memberikan sumber polen utama, yaitu serbuk sari dari bunga jantan dan betina yang dimanfaatkan oleh lebah untuk kebutuhan protein dan pembangunan koloni, Hasil penelitian Mulyono et al., (2015) menyatakan bahwa tanaman akasia merupakan tanaman yang paling sering dikunjungi lebah sebagai tanaman penghasil nektar ekstra floral, tanaman kelapa sawit sebagai tanaman penghasil polen dan tanaman karet sebagai tanaman penghasil nektar dengan intensitas kunjungan lebah yang lebih rendah.

4) Serduduk, merupakan jenis tanaman semak berbunga ungu yang bunganya dimanfaatkan oleh lebah sebagai sumber nektar. Bunga senduduk menghasilkan nektar dan polen dalam jumlah sedang hingga tinggi, menjadikannya sumber pakan penting bagi lebah madu terutama saat musim kemarau atau pada saat musim tebang akasia.

B. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu dalam penelitian ini berfungsi sebagai landasan teoritis utama yang menyediakan kerangka konsep teruji, mengidentifikasi *research gap* melalui celah atau kontroversi studi sebelumnya, menentukan pemilihan metode pengumpulan dan analisis data yang tepat berdasarkan pendekatan relevan, menjadi pembanding hasil penelitian baru untuk memperkuat analisis perbandingan, serta memperkaya referensi pustaka guna menjaga orisinalitas, kredibilitas ilmiah, dan menghindari plagiarisme secara keseluruhan.

Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu

NO.	NAMA PENELITI, TAHUN	JUDUL	PENDEKATAN & ANALISIS	TOPIK	PEMBAHASAN	PERSAMAAN	PERBEDAAN
1.	Widiana, L. V. W., dkk. (2024).	Framework Problem Solving-Based Augmented Reality Media to Empower Scientific Explanation Skill	Penelitian ini menggunakan pendekatan Problem Based Learning (PBL) dalam pengembangan media pembelajaran berbasis Augmented Reality (AR). Analisis data dilakukan melalui uji efektivitas dengan desain kuantitatif, yang mengukur peningkatan kemampuan penjelasan ilmiah peserta didik melalui perbandingan hasil pretest dan posttest.	Topik yang dibahas ialah media AR berbasis kerangka *proble m solving* untuk meningkatkan kemampuan penjelatsan ilmiah.	Mengembangkan media AR dengan tahapan problem solving (identifikasi masalah, analisis informasi, perumusan solusi) pada materi sistem peredaran darah. Dan juha penelitian ini menunjukkan bahwa media AR berbasis problem solving secara signifikan meningkatkan kemampuan penjelasan ilmiah siswa dibanding media 2D.	Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan, yaitu sama-sama memanfaatkan Augmented Reality (AR) sebagai media pembelajaran serta berorientasi pada peningkatan kemampuan pemecahan masalah peserta didik melalui pembelajaran interaktif.	Perbedaan terletak pada penggunaan model pembelajaran, di mana penelitian ini menggunakan Problem Based Learning (PBL), Selain itu, penelitian ini berfokus pada kemampuan penjelasan ilmiah, serta tidak mengintegrasikan aspek Digital Habits of Mind.
2.	Tanjung, A. K. P., dkk. (2024)	Student Worksheets with Discovery Learning	Penelitian ini menggunakan pendekatan Discovery Learning dalam pengembangan LKPD	Topik yang dikemukakan dalam penelitian ini ialah LKPD kimia	Mengembangkan LKPD dengan model *discovery learning* yang dilengkapi AR untuk menampilkan	Persamaan dengan penelitian yang dilakukan terletak pada	Perbedaan utama terletak pada model pembelajaran yang digunakan,

NO.	NAMA PENELITI, TAHUN	JUDUL	PENDEKATAN & ANALISIS	TOPIK	PEMBAHASAN	PERSAMAAN	PERBEDAAN
		Model Based on Augmented Reality on Chemical Bonding Material	berbasis Augmented Reality (AR). Analisis dilakukan melalui uji kelayakan, kepraktisan, dan keefektifan untuk mengetahui pengaruh media terhadap motivasi dan hasil belajar peserta didik.	berbasis *discovery learning* dengan AR pada materi ikatan kimia.	bentuk 3D molekul dan ikatan. Hasil penelitian menunjukkan LKPD sangat layak, mudah digunakan, dan efektif meningkatkan motivasi dan hasil belajar siswa.	penggunaan LKPD berbasis Augmented Reality (AR) sebagai media pembelajaran serta tujuan untuk meningkatkan kualitas hasil belajar peserta didik.	yaitu Discovery Learning, Selain itu, penelitian ini berfokus pada motivasi dan hasil belajar, sedangkan Perbedaan lainnya terdapat pada materi pembelajaran, yaitu kimia, serta tidak mengkaji Digital Habits of Mind.
3.	Fendi, R. D., Suyatna, A., & Abdurrahman, A. (2021)	Augmented Reality-Based Student Worksheet to Stimulate Students' Critical Thinking Skills	Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan LKPD berbasis Augmented Reality (AR) yang terintegrasi dengan latihan berpikir kritis. Analisis dilakukan dengan mengukur peningkatan kemampuan berpikir kritis peserta didik melalui instrumen penilaian yang relevan.	LKPD berbasis Augmented Reality untuk melatihkan keterampilan berpikir kritis.	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan *student worksheet* berbasis AR pada materi IPA (fisika) yang memadukan tampilan 3D dengan tugas-tugas berpikir kritis. Penelitian ini Menunjukkan bahwa LKPD berbasis AR yang divalidasi ahli dan diujicobakan mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa dibanding	Persamaan dengan penelitian yang dilakukan adalah penggunaan LKPD berbasis Augmented Reality (AR) serta fokus pada pengembangan kemampuan berpikir tingkat tinggi peserta didik melalui	erbedaan terletak pada fokus kemampuan yang dikembangkan, di mana penelitian ini menitikberatkan pada kemampuan berpikir kritis, Selain itu, penelitian ini tidak menggunakan model Project Based Learning (PjBL) dan tidak

NO.	NAMA PENELITI, TAHUN	JUDUL	PENDEKATAN & ANALISIS	TOPIK	PEMBAHASAN	PERSAMAAN	PERBEDAAN
					pembelajaran konvensional.	pembelajaran aktif.	mengintegrasikan aspek Digital Habits of Mind.
4.	Tarigan, F., A., & Adlini, M., N. (2024)	Development of Augmented Reality Based Student Worksheet for Biology Sensory System Topic	Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dalam pengembangan LKPD berbasis Augmented Reality (AR). Analisis dilakukan melalui uji validitas, kepraktisan, dan keefektifan untuk menilai kelayakan media pembelajaran.	Pengembangan *student worksheet* biologi berbasis AR	Penelitian ini merupakan penelitian Mengembangkan LKPD biologi berbasis AR pada topik sistem indera, divalidasi ahli dan diuji kepraktisan serta keefektifannya untuk meningkatkan pengalaman belajar dan pemahaman konsep melalui visualisasi 3D.	Persamaan dengan penelitian yang dilakukan terletak pada penggunaan LKPD berbasis Augmented Reality (AR) serta pendekatan pengembangan media pembelajaran untuk meningkatkan pemahaman konsep peserta didik.	Perbedaan terletak pada fokus penelitian, yaitu pada peningkatan pemahaman konsep. Selain itu, penelitian ini tidak menggunakan model Project Based Learning (PjBL) dan tidak mengkaji aspek Digital Habits of Mind, serta memiliki perbedaan pada materi pembelajaran.
5.	Bashri dkk (2025)	Student Worksheet Based on AR Cells and Tissues to Train Spatial Thinking and	Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan LKPD berbasis Augmented Reality (AR) dengan fokus pada peningkatan	LKPD biologi berbasis AR untuk kemampuan spasial & pemecahan masalah	Penelitian ini bertujuan untuk Mengembangkan aplikasi AR dan lembar kerja tentang sel & jaringan untuk meningkatkan kemampuan berpikir spasial dan pemecahan	Persamaan dengan penelitian yang dilakukan adalah penggunaan Augmented Reality (AR)	Perbedaan terletak pada fokus kemampuan yang dikembangkan, yaitu kemampuan spasial,. Selain itu, penelitian ini tidak

NO.	NAMA PENELITI, TAHUN	JUDUL	PENDEKATAN & ANALISIS	TOPIK	PEMBAHASAN	PERSAMAAN	PERBEDAAN
		Problem Solving	kemampuan spasial dan pemecahan masalah peserta didik. Analisis dilakukan melalui uji efektivitas terhadap peningkatan kemampuan tersebut.		masalah mahasiswa/prospektif guru biologi, dengan penilaian validitas dan efektivitas.	dalam LKPD serta adanya keterkaitan dengan pengembangan kemampuan pemecahan masalah peserta didik.	menggunakan model Project Based Learning (PjBL) dan tidak mengintegrasikan Digital Habits of Mind, serta memiliki perbedaan pada materi pembelajaran.

C. Kerangka Pemikiran

Berdasarkan kajian teori yang telah dipaparkan, kerangka berpikir penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut. Permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian ini adalah rendahnya kemampuan peserta didik dalam merencanakan penyelesaian masalah secara sistematis dan berbasis bukti, yang merupakan salah satu indikator penting dari *Digital Habits of Mind* ke-4 yang dibutuhkan di era digital (Howell, 2012). Di sisi lain, pembelajaran biologi konvensional, khususnya pada konsep serangga dan ekosistem, masih didominasi oleh penyampaian konten satu arah yang belum memberikan ruang cukup bagi peserta didik untuk berlatih merumuskan, mengevaluasi, dan merencanakan implementasi solusi secara nyata.

Kerangka pemikiran pada penelitian ini, berawal dari tuntutan pembelajaran abad ke-21 yang menekankan bahwa pentingnya penguasaan keterampilan berpikir tingkat tinggi, kemampuan pemecahan masalah, serta literasi digital peserta didik sebagai bekal menghadapi kompleksitas kehidupan di era digital. Dalam konteks pembelajaran biologi, pada materi Ekosistem, khususnya pada konsep serangga, materi masih banyak disajikan secara abstrak dan tekstual sehingga peserta didik kesulitan menghubungkan konsep dengan fenomena nyata dan belum terlatih merencanakan langkah penyelesaian masalah secara sistematis. Kondisi ini menunjukkan perlu adanya inovasi media dan model pembelajaran yang tidak hanya membantu meningkatkan hasil belajar secara kognitif saja, tetapi juga mengembangkan kemampuan perencanaan pemecahan masalah sebagai bagian dari *Digital Habits of Mind.*

Untuk menjawab permasalahan ini, penelitian ini mengintegrasikan tiga komponen utama yang saling menguatkan: (1) *E-Worksheet* berbasis Wizer.me sebagai media pembelajaran interaktif yang memandu peserta didik melalui setiap tahapan PjBL; (2) model PjBL sebagai kerangka pembelajaran yang menempatkan proyek sebagai inti dari proses belajar dan secara alami mendorong pengembangan kemampuan tanggap; dan (3) teknologi AR berbasis Sketchfab 3D sebagai media eksplorasi yang memberikan pengalaman visualisasi morfologi serangga polinator secara tiga dimensi, sehingga

memperkaya basis data empiris yang digunakan peserta didik dalam merumuskan dan mengevaluasi solusi.

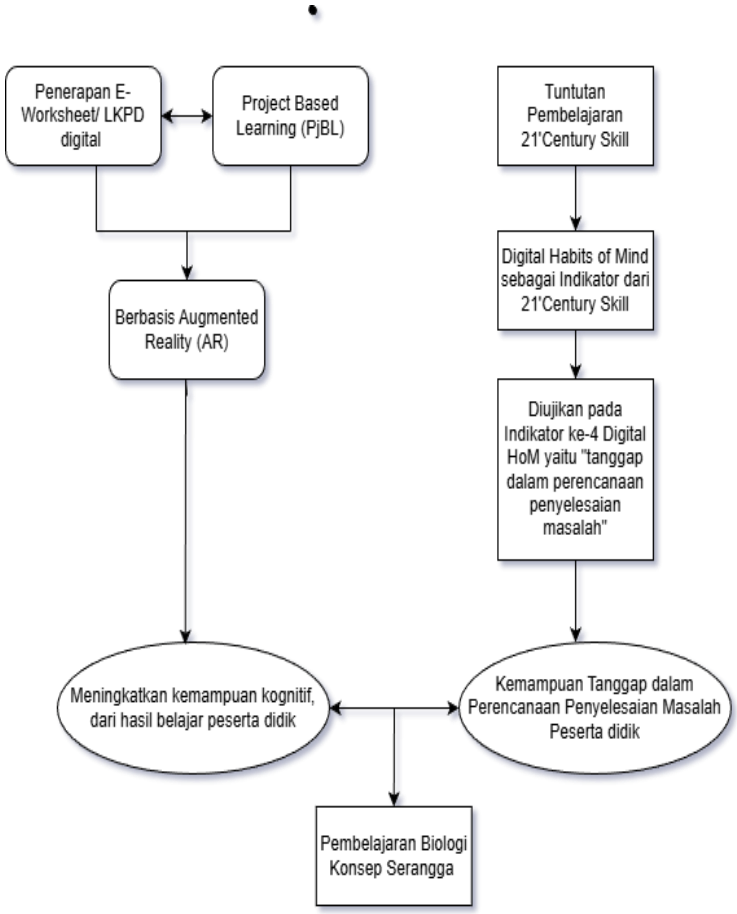
Ketiga komponen tersebut bekerja secara sinergis: AR memperkaya pengalaman observasi (input data); E-Worksheet PjBL memandu proses berpikir terstruktur dan produk akhir berupa PPT interaktif yang dinilai melalui Peer Group Assessment menjadi indikator terukur dari capaian kemampuan tanggap peserta didik. Secara keseluruhan, integrasi ketiga komponen ini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan tanggap peserta didik dalam perencanaan penyelesaian masalah sebagai manifestasi dari indikator ke-4 Digital Habits of Mind (Howell, 2012; Hizqiyah et al., 2023).

Sebagai respons terhadap kebutuhan tersebut, penelitian ini memposisikan e-*worksheet* berbasis *Project Based Learning* (PjBL) yang terintegrasi dengan *Augmented Reality* (AR) sebagai inti intervensi pembelajaran untuk meningkatkan hasil belajar kognitif peserta didik pada konsep serangga, yang diukur melalui perbandingan skor pretest dan posttest. Sintaks PjBL dalam *e-worksheet* yang memiliki alur terstruktur mulai dari perumusan pertanyaan mendasar, perencanaan dan pelaksanaan proyek, hingga refleksi, sehingga peserta didik terarah dalam membangun pemahaman konseptual secara bertahap. Integrasi AR sendiri di dalam *e-worksheet* memungkinkan visualisasi objek serangga secara tiga dimensi (3D) dan interaktif, sehingga peserta didik dapat mengamati struktur tubuh, siklus hidup, dan peran ekologis serangga secara lebih konkret, yang diharapkan berkontribusi langsung terhadap peningkatan pemahaman konsep dan hasil belajar kognitif.

Setelah peningkatan hasil belajar kognitif tercapai melalui keterlibatan aktif dalam kegiatan proyek dan pemanfaatan AR, penelitian ini menempatkan indikator ke-4 *Digital Habits of Mind*, yaitu kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah, sebagai capaian lanjutan yang berkorelasi dengan keberhasilan intervensi. Melalui *e-worksheet* PjBL berbasis AR, peserta didik tidak hanya memahami konsep, tetapi juga dilatih untuk merumuskan masalah, mengumpulkan dan mengolah informasi digital, mengevaluasi alternatif solusi, serta menyusun rencana tindakan yang sistematis dan realistis berdasarkan data yang diperoleh. Proses ini

mencerminkan keterkaitan antara penguatan aspek kognitif (terlihat dari peningkatan skor pretest–posttest) dengan pembentukan kebiasaan berpikir digital yang tanggap dan terarah dalam merencanakan penyelesaian masalah sebagai wujud indikator ke-4 *Digital Habits of Mind.*

Demikian, kerangka berpikir penelitian ini menegaskan bahwa penerapan *e-worksheet* PjBL berbasis AR pada pembelajaran biologi konsep serangga terlebih dahulu diharapkan meningkatkan hasil belajar kognitif peserta didik, yang terukur secara kuantitatif melalui pretest dan posttest, dan selanjutnya berkontribusi untuk dapat mengembangan indikator ke-4 *Digital Habits of Mind* melalui pembiasaan merencanakan penyelesaian masalah secara digital, kritis, dan reflektif, sebagai solusi yang efektif untuk menjawab tuntuan pembelajaran abad-21.



Gambar 2. 22 Kerangka Pemikiran Penelitian

D. Asumsi dan Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran, penelitian ini berpijak pada premis bahwa integrasi teknologi imersif dalam model pembelajaran berbasis proyek dapat mengeliminasi hambatan konseptual sekaligus menumbuhkan pola pikir digital yang strategis. Oleh karena itu, guna memberikan arah yang jelas dalam pembuktian empiris, maka disusunlah asumsi dan hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. Asumsi

Asumsi pada penelitian ini berfungsi sebagai landasan dasar untuk desain *Pre-experimental one group pretest-posttest* dalam penerapan *e-worksheet* PjBl berbasis AR guna meningkatkan kemampuan tanggap siswa pada konsep serangga, dengan membatasi ruang lingkup pada aksesibilitas media dan kemampuan dasar teknologi siswa untuk memastikan validitas intervensi dan interpretasi hasil *pretest-posttest*. Berdasarkan kerangka pemikiran diatas, maka asumsi yang dapat ditarik meliputi:

a. *E-Worksheet* berbasis *Project Based Learning* (PjBL) yang terintegrasi *Augmented Reality* (AR) secara teoritis dapat memfasilitasi peserta didik dalam mengembangkan kemampuan tanggap pada perencanaan penyelesaian masalah melalui aktivitas penyelidikan, pengambilan keputusan, dan penyusunan solusi.
b. Kemampuan tanggap dalam perencanaan penyelesaian masalah merupakan salah satu manifestasi *Digital Habits of Mind* yang dapat dikembangkan melalui pengalaman belajar yang melibatkan pemecahan masalah autentik, refleksi, dan penggunaan teknologi digital.
c. *Augmented Reality* (AR) mampu membantu peserta didik memvisualisasikan konsep serangga yang bersifat abstrak sehingga mendukung pemahaman konsep dan proses pengambilan keputusan dalam penyelesaian masalah.
d. Materi peranan serangga dalam ekosistem mengandung permasalahan kontekstual yang memungkinkan peserta didik mengembangkan kemampuan merumuskan solusi, mengevaluasi solusi, dan merencanakan implementasi solusi.

e. Peserta didik kelas X telah memiliki kemampuan dasar dalam menggunakan perangkat digital sehingga dapat mengikuti pembelajaran berbantuan *E-Worksheet* dan *Augmented Reality* secara optimal.

2. Hipotesis

Berdasarkan panduan penelitian Karya Tulis Ilmiah (KTI) Unpas (2024, hlm. 14) mengatakan bahwa hipotesis merupakan jawaban sementara untuk pertanyaan dan sub-pertanyaan. Pertanyaan atau sub-pertanyaan telah ditetapkan dalam kerangka ideologis dalam teori, tetapi belum diuji secara empiris. Hipotesis pada penelitian, dirumuskan dalam bentuk pernyataan yang dapat diuji (H0 dan Ha), dengan asumsi desain penelitian *Pre-Experimental* dengan desain *one group pretest-posttest, dan one shoot study cased*, adapun hipotesis dalam penelitian ini dapat memberikan hasil sementara yaitu:

Hipotesis dirumuskan secara statistik, dengan fokus pada perbedaan skor pretest dan posttest pada satu kelompok (n = satu kelas/sampel). Hipotesis nol (H_0) dan alternatif (H_1) sebagai berikut:

a) H_0: Tidak terdapat perbedaan signifikan kemampuan tanggap peserta didik dalam perencanaan penyelesaian masalah konsep serangga sebelum dan sesudah penerapan e-worksheet PjBl berbasis AR (skor posttest ≤ skor pretest, dengan $\alpha = 0{,}05$).

b) H_a: Terdapat peningkatan signifikan kemampuan tanggap peserta didik dalam perencanaan penyelesaian masalah konsep serangga setelah penerapan e-worksheet PjBl berbasis AR (skor posttest > skor pretest, dengan $\alpha = 0{,}05$).