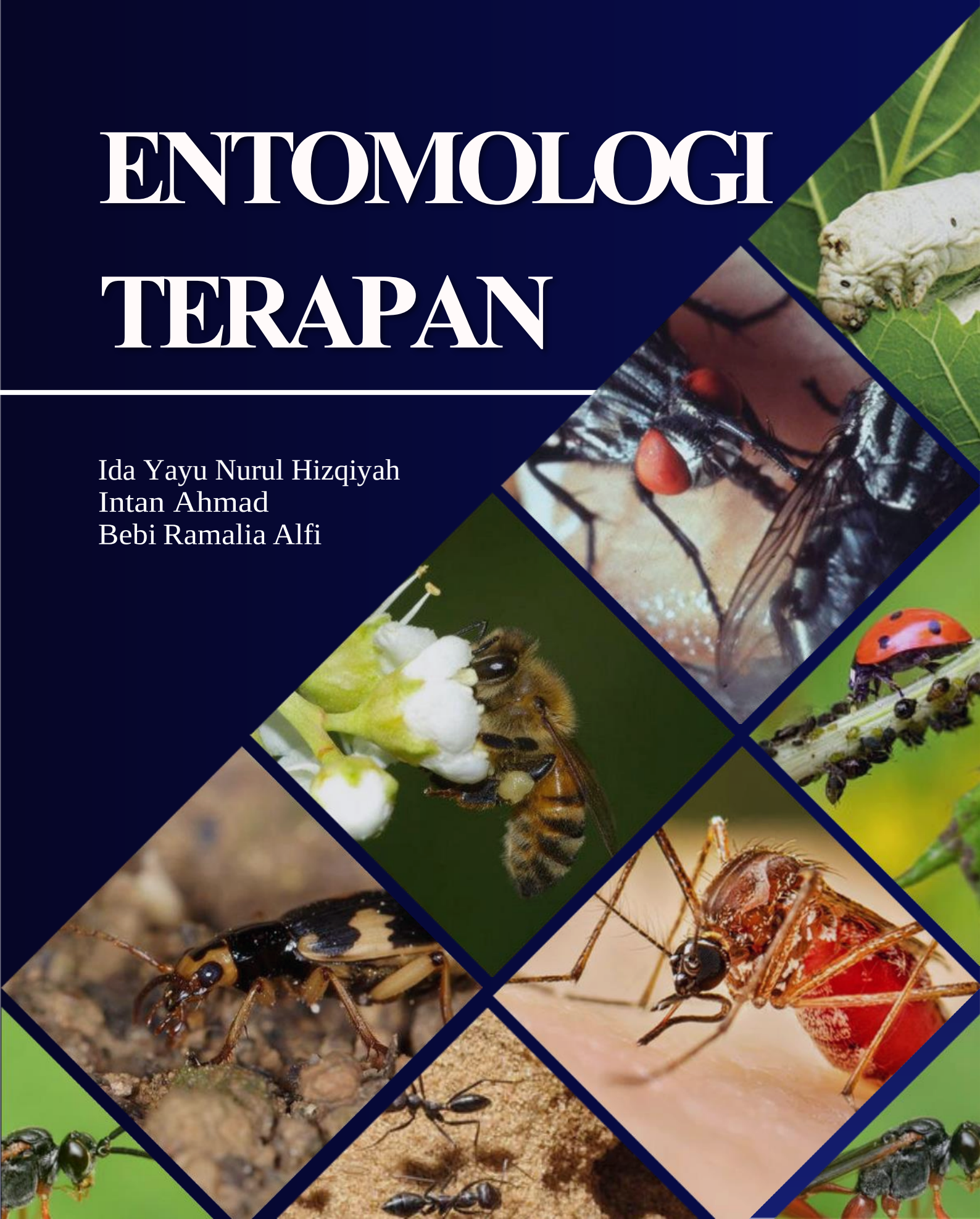
ENTOMOLOGI TERAPAN

Ida Yayu Nurul Hizqiyah
Intan Ahmad
Bebi Ramalia Alfi



ENTOMOLOGI TERAPAN

Ida Yayu Nurul Hizqiyah
Intan Ahmad
Bebi Ramalia Alfi

Penerbit :
CV KIMFA MANDIRI

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
Dilarang keras memperbanyak, memfotokopi sebagian atau seluruh isi buku ini, serta memperjualbelikannya tanpa mendapat izin tertulis dari Penerbit.
@2025, Penerbit CV. Kimfa Mandiri, Bandung
(285 halaman) 18,2 x 21 cm

ENTOMOLOGI TERAPAN

PENULIS :
Ida Yayu Nurul Hizqiyah
Intan Ahmad
Bebi Ramalia Alfi

Editor:
Prof. Dr. Mulyaningsih, M.Si

Tata Letak: Desain Cover:
Tim Penyusun

Penerbit:
CV. Kimfa Mandiri
JL. Raya Ciapus Rt 01 Rw 06 Desa. Ciapus Kec. Banjaran
Kab Bandung 40377
Telp: 022-85945637 - 085314983618 – 081220816826
Website: kimfamandiri.or.id
E-mail: kimfamandiriks@gmail.com

Mei, 2025
ISBN : 978-634-7487-02-5



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku e-worksheet berjudul <Entomologi Terapan: *Project-Based Learning* Berbasis *Augmented Reality* untuk Membangun *Digital Habits Of Mind* Mahasiswa Calon Guru Biologi= dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini dirancang sebagai panduan praktis bagi peserta didik dan pendidik untuk mengeksplorasi dunia serangga melalui pendekatan pembelajaran yang inovatif dan terintegrasi.

Konsep utama buku ini adalah penggabungan Pembelajaran Berbasis Proyek (*PjBL)* dengan teknologi *Augmented Reality* (*AR*), yang menghadirkan pengalaman belajar imersif dan interaktif. Dengan konsep ini, peserta didik tidak hanya mengerjakan proyek nyata yang relevan dengan entomologi terapan, tetapi juga dapat memvisualisasikan morfologi, siklus hidup, dan interaksi ekologis serangga dalam bentuk *3D* yang hidup.

Keterkaitan pendekatan ini dengan kebutuhan pendidikan masa kini sangat jelas. Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mengubah paradigma pembelajaran, dan sejalan dengan tuntutan keterampilan abad ke-21, pendidikan biologi dituntut tidak hanya menyampaikan pengetahuan, tetapi juga menumbuhkan kemampuan berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan pemecahan masalah. Integrasi *PjBL* dan *AR* dalam buku ini menjembatani kebutuhan tersebut sekaligus menghubungkan pembelajaran dengan tantangan nyata, seperti pengendalian hama dan keberlanjutan ekosistem, sehingga membuat biologi lebih kontekstual dan bermakna.

Kami menyadari bahwa keberhasilan implementasi pendekatan ini tidak terlepas dari dukungan dan kontribusi berbagai pihak. Oleh karena itu, kami menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada semua pihak yang telah memberikan inspirasi, dukungan, dan bantuan dalam penyusunan buku e-worksheet ini. Besar harapan kami, buku *PjBL* berbasis *AR* dalam Entomologi Terapan ini dapat menjadi sumber belajar yang berharga, memfasilitasi pengalaman belajar yang mendalam, menyenangkan, serta relevan dengan kebutuhan abad ke-21. Masukan konstruktif dari para pembaca tentu sangat kami nantikan demi penyempurnaan buku ini ke depan.

Buku *e-worksheet* ini dirancang untuk menjembatani kesenjangan antara pendidikan biologi konvensional dan tuntutan keterampilan abad ke-21. Dengan mengintegrasikan Pembelajaran Berbasis Proyek (*PjBL)* dan teknologi *Augmented Reality (AR)*, buku ini tidak hanya mengajak peserta didik untuk memahami dunia serangga, tetapi juga membekali peserta didik mahasiswa calon guru biologi dengan kemampuan digital habits of mind. Melalui pendekatan ini, pembelajaran menjadi lebih dari sekadar teori; ia terhubung langsung dengan tantangan nyata seperti keberlanjutan ekosistem dan pengendalian hama, menjadikan biologi sebagai ilmu yang relevan, kontekstual, dan bermakna.

Bandung, 10 Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar i
Daftar Isi ii

BAB 1 : Landasan Teori dan Konseptual Pembelajaran Entomologi Terapan Berbasis *PjBL-AR*..... 1
A. Pendahuluan..... 2
B. Konsep Dasar Entomologi Terapan 5
C. Prinsip-Prinsip *Project Based Learning (PjBL)* 8
D. Teknologi *Augmented Reality (AR)* dalam Pembelajaran 20
E. Integrasi *PjBL*, *AR*, & *E-Worksheet*..... 24

BAB 2 : Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga.
Lebah Madu (*Apis mellifera)* 31

BAB 3 : Serangga Sebagai Pengendali Hayati
Kepik Predator *(Coccinellidae)* 62

BAB 4 : Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrem.
Semut Gurun *(Cataglyphis bombycina)* 87

BAB 5 : Serangga sebagai Vektor Penyakit.
Nyamuk DBD *(Aedes aegyptii)* 111

BAB 6 : Peran Serangga dalam Dekomposisi.
Lalat bangkai *(Sarcophaga sp)* 138

BAB 7 : Serangga yang Menghasilkan Bahan Bernilai Ekonomi.
Ulat Sutra *(Bombyx mori)* 161

BAB 8 : Parasitisme oleh Serangga.
Tawon parasitoid (Ichneumonidae) 194

BAB 9 : Strategi Pertahanan Serangga Beracun.
Kumbang Bombardir *(Brachinus sp)* 218

BAB 10 : Evaluasi Proyek dan Refleksi Belajar Berbasis *Augmented Reality*

A. Tujuan Pembelajaran Evaluatif 253

B. Penilaian Proyek *PjBL* 254

C. Portofolio Proyek Digital..... 257

D. Refleksi Pembelajaran dan Pengalaman 259

E. Kuis dan Evaluasi Berbasis *AR* 266

F. Forum Diskusi dan Umpan Balik 269

G. Studi Kasus Proyek Nyata..... 270

PENUTUP 271
GLOSARIUM 272

DAFTAR PUSTAKA 275

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB I

Landasan Teori dan Konseptual Pembelajaran Entomologi Terapan

Berbasis PjBL-AR



A. PENDAHULUAN

Entomologi terapan merupakan cabang ilmu biologi yang mempelajari serangga dalam konteks praktis untuk mendukung kesejahteraan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Ilmu ini tidak hanya menyoroti peran serangga sebagai hama, tetapi juga mengkaji kontribusi pentingnya dalam berbagai layanan ekosistem, seperti penyerbukan, daur ulang bahan organik, pengendalian hayati, serta sebagai indikator kesehatan lingkungan. Menurut Capinera (2008), pemahaman yang komprehensif mengenai fungsi ekologis serangga menjadi landasan penting bagi pendidikan vokasi dan terapan, terutama untuk menghasilkan tenaga profesional yang responsif terhadap tantangan di sektor pertanian, kesehatan masyarakat, konservasi, dan industri bioteknologi. Untuk itu, pembelajaran entomologi perlu bersifat kontekstual dan relevan dengan kebutuhan dunia kerja. Namun, kompleksitas morfologi, siklus hidup, dan interaksi ekologis serangga sering kali menjadi kendala dalam pendekatan konvensional. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi pembelajaran yang inovatif untuk menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik di lapangan..

Menurut Driver et al. (1994), keterbatasan akses terhadap lingkungan lapangan atau laboratorium dengan peralatan lengkap juga menjadi hambatan signifikan, terutama dalam konteks pendidikan vokasi dan terapan yang membutuhkan pemahaman mendalam tentang aplikasi praktis. Kondisi ini menuntut pengembangan metode pembelajaran yang mampu mereplikasi pengalaman lapangan dan laboratorium secara efektif. Akibatnya, peserta didik mungkin mengalami kesulitan dalam menghubungkan konsep teoretis dengan fenomena dunia nyata, menghambat pengembangan keterampilan analisis dan pemecahan masalah yang esensial dalam bidang ini. Jelas, penguasaan entomologi terapan yang komprehensif adalah kunci untuk mencetak tenaga ahli yang kompeten.

Integrasi teknologi dan simulasi dapat menjadi solusi strategis untuk mengatasi keterbatasan ini. Dengan demikian, peserta didik dapat mengembangkan kompetensi praktis yang relevan dengan tuntutan dunia kerja, bahkan tanpa selalu harus berada di lapangan.Bab ini akan menguraikan bagaimana perpaduan *Project-Based Learning* (*PjBL*), sebuah metodologi yang mendorong pembelajaran aktif melalui proyek autentik, dengan visual dari teknologi *Augmented Reality y*ang mampu menghadirkan visualisasi *3D* interaktif, dapat mentransformasi pembelajaran entomologi terapan.

Kami akan menggali konsep dasar entomologi terapan, prinsip-prinsip *PjBL*, menurut Dunleavy dan Dede (2013), potensi *AR* dalam pendidikan sains, dan bagaimana ketiganya berintegrasi secara harmonis dalam bentuk e-worksheet, menciptakan lingkungan belajar yang dinamis dan relevan bagi peserta didik. Pendekatan ini menjanjikan peningkatan keterlibatan dan pemahaman yang lebih mendalam.

Pembelajaran entomologi terapan tradisional sering kali mengandalkan buku teks, diagram dua dimensi, dan spesimen awetan yang terbatas. Meskipun metode ini memiliki nilai, mereka seringkali gagal dalam merepresentasikan dinamika dan kompleksitas serangga secara utuh. Tantangan utama terletak pada visualisasi struktur mikro serangga, pergerakan kompleks, dan interaksi ekologis dalam skala besar yang sulit diamati di lingkungan kelas, suatu kondisi yang menegaskan perlunya representasi yang lebih kaya sebagaimana disarankan dalam literatur tentang lingkungan belajar yang efektif (Jonassen & Land, 2012). Keterbatasan ini sering menghambat peserta didik dalam membangun pemahaman konseptual yang kuat.

Keterbatasan akses terhadap lingkungan lapangan atau laboratorium dengan peralatan lengkap juga menjadi hambatan signifikan, terutama dalam konteks pendidikan vokasi dan terapan yang membutuhkan pemahaman mendalam tentang aplikasi praktis, sebagaimana ditekankan oleh teori pembelajaran tersituasi (Lave & Wenger, 1991). Hal ini menimbulkan tantangan serius dalam mempersiapkan lulusan yang siap kerja. Akibatnya, peserta didik mungkin mengalami kesulitan dalam menghubungkan konsep teoretis dengan fenomena dunia nyata, menghambat pengembangan keterampilan analisis dan pemecahan masalah yang esensial dalam bidang ini, kondisi yang mengindikasikan terputusnya siklus pembelajaran eksperiensial (Kolb, 2014). Solusi inovatif sangat diperlukan untuk mengatasi kendala pedagogis ini.

Menyadari adanya tantangan tersebut, integrasi *(PjBL)* menawarkan solusi pedagogis yang kuat. Menurut Thomas (2003), *PjBL* didefinisikan secara operasional sebagai pendekatan pembelajaran di mana peserta didik memperoleh pengetahuan dan keterampilan melalui pengerjaan proyek-proyek yang kompleks, autentik, dan menantang dalam waktu tertentu, mengedepankan pembelajaran berpusat pada peserta didik melalui keterlibatan aktif dalam proyek-proyek yang relevan dan menantang.

Dalam konteks entomologi terapan, peserta didik dapat diarahkan untuk mengidentifikasi hama pada tanaman tertentu, merancang strategi pengendalian

hama biologis, atau menganalisis peran penyerbuk dalam ekosistem lokal. Pendekatan ini tidak hanya mendorong pengembangan pengetahuan konseptual, tetapi juga memupuk keterampilan kritis seperti kolaborasi, berpikir kritis, komunikasi, dan pemecahan masalah, yang semuanya sangat dibutuhkan di dunia kerja. Sejalan dengan filosofi John Dewey yang menekankan *'learning by doing*', dengan *PjBL*, pembelajaran menjadi lebih bermakna dan aplikatif, karena peserta didik secara langsung terlibat dalam memecahkan masalah autentik yang berkaitan dengan bidang entomologi terapan

Selanjutnya, kekuatan *Augmented Reality (AR)* hadir sebagai katalisator revolusioner dalam meningkatkan pengalaman *PjBL* ini. Menurut Azuma (2001), *Augmented Reality (AR)*, secara operasional dapat dipahami sebagai teknologi yang memungkinkan penambahan objek virtual tiga dimensi *(3D)* ke dalam lingkungan nyata secara real-time melalui perangkat seperti smartphone atau tablet, sehingga pengguna dapat berinteraksi dengan objek virtual tersebut seolah-olah ada di dunia fisik. *AR* memiliki kemampuan unik untuk menempatkan objek virtual tiga dimensi *(3D)* ke dalam lingkungan nyata, memungkinkan peserta didik berinteraksi dengan model serangga yang detail, melihat siklus hidup mereka dalam visualisasi dinamis, bahkan 'membedah' struktur internal secara virtual.

Bayangkan peserta didik dapat memproyeksikan model *3D* kumbang ke meja mereka, memutar, memperbesar, bahkan melihat organ dalam seolah-olah serangga tersebut ada di hadapan mereka. Menurut Mayer (2001), interaktivitas ini mengatasi batasan visualisasi tradisional, memungkinkan pemahaman lebih mendalam tentang morfologi dan anatomi serangga. Pengalaman belajar semacam ini akan jauh lebih menarik dan efektif daripada sekadar melihat gambar dua dimensi. Ini juga membuka pintu bagi eksplorasi mandiri dan pemecahan masalah yang lebih kompleks. . Dengan demikian, kombinasi *PjBL* dan *AR* dalam bentuk *e-worksheet* (lembar kerja digital yang terintegrasi dengan elemen interaktif dan teknologi *AR)* menciptakan lingkungan belajar yang imersif dan interaktif, yang, menurut Kolb (1984), secara efektif menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik, serta mempersiapkan peserta didik dengan lebih baik untuk tantangan profesional di bidang entomologi terapan.

B. KONSEP DASAR ENTOMOLOGI TERAPAN

Entomologi terapan adalah disiplin ilmu yang berfokus pada studi serangga dan aplikasinya untuk memecahkan masalah praktis yang berkaitan dengan manusia, lingkungan, dan ekosistem. Menurut Borror *et al* (1989), entomologi terapan mencakup spektrum luas aplikasi praktis, mulai dari manajemen hama hingga peran ekologis serangga sebagai penyerbuk dan dekomposer. Pedigo dan Rice (1996) juga menyebutkan bahwa entomologi turut mencakup manajemen hama di bidang pertanian, pengendalian vektor penyakit dalam kesehatan masyarakat, pemanfaatan serangga dalam forensik, hingga peran krusial serangga sebagai penyerbuk dan dekomposer dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Pemahaman mendalam tentang serangga dimulai dari pengenalan dasar, termasuk klasifikasi, anatomi, dan morfologi.

Untuk mempermudah pemahaman ini, bab ini akan dilengkapi dengan contoh penggunaan *Augmented Reality (AR)* sederhana yang memungkinkan peserta didik untuk mengeksplorasi & mengidentifikasi bagian-bagian tubuh serangga secara interaktif dalam bentuk *3D*, memberikan pengalaman visual yang lebih kaya dibandingkan gambar dua dimensi, sebagaimana ditekankan oleh Billinghurst dan Duenser (2012) mengenai manfaat *AR* dalam pembelajaran. Dengan *AR*, objek kompleks seperti serangga dapat divisualisasikan dari berbagai sudut, memungkinkan eksplorasi detail yang tidak mungkin dilakukan dengan metode konvensional. Pendekatan ini akan meningkatkan keterlibatan peserta didik dan memperkuat pemahaman mereka tentang struktur serangga secara fundamental.

Salah satu pilar utama entomologi terapan adalah pengendalian hama. Dalam konteks ini, menurut Metcalf dan Luckmann (1994), hama didefinisikan secara operasional sebagai setiap spesies serangga yang menimbulkan kerugian ekonomi, ekologi, atau estetika pada tanaman budidaya, ternak, atau produk simpanan, serta mengganggu kesehatan manusia. Strategi pengendalian hama modern tidak lagi hanya berfokus pada penggunaan pestisida kimia, melainkan juga mengadopsi pendekatan Pengendalian Hama Terpadu (PHT), sebagai pendekatan holistik dan berkelanjutan yang, menurut Kogan (1998), menekankan integrasi berbagai metode pengendalian.

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang secara operasional diartikan sebagai sistem pengendalian hama yang mempertimbangkan semua teknik pengendalian yang tersedia dan mengintegrasikan tindakan yang tepat untuk

menjaga populasi hama di bawah ambang batas kerusakan ekonomi atau pada tingkat yang dapat ditoleransi (untuk hama permukiman) dengan menggunakan cara yang paling tidak berbahaya bagi manusia dan lingkungan, melibatkan kombinasi metode biologis, kultur teknis, fisik, genetik, dan kimia. Menurut Kogan (1998), pemahaman yang komprehensif tentang siklus hidup hama, ekologi, dan musuh alaminya merupakan prasyarat untuk merancang strategi PHT yang efektif dan berkelanjutan, meminimalkan dampak negatif terhadap keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem.

Serangga tidak hanya berperan sebagai hama, tetapi juga sebagai komponen vital dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mendukung kehidupan manusia. Salah satu fungsi ekologis terpenting adalah sebagai penyerbuk. Serangga seperti lebah, kupu-kupu, lalat, dan beberapa jenis kumbang secara aktif memfasilitasi proses transfer serbuk sari dari kepala sari ke putik bunga—proses esensial dalam reproduksi tanaman berbunga, termasuk berbagai tanaman pangan strategis.

Menurut Klein et al. (2007), peran serangga penyerbuk dalam menjaga produksi pangan global dan keanekaragaman hayati tidak dapat diabaikan. Lebih lanjut, Ritchie (2021) menyatakan bahwa sekitar 75% dari spesies tanaman pangan dunia bergantung pada penyerbukan oleh hewan, terutama serangga. Meski hanya sekitar 35% dari total volume produksi pangan global yang benar-benar bergantung pada penyerbukan, tanaman-tanaman ini cenderung bernilai ekonomi tinggi dan kaya nutrisi, seperti buah-buahan, sayuran, kacang-kacangan, dan kopi.

Tanpa serangga penyerbuk, dunia akan menghadapi penurunan hasil panen, berkurangnya kualitas produk pertanian, dan terganggunya ketahanan pangan, terutama di negara-negara berkembang. Maka dari itu, keberadaan serangga penyerbuk bukan sekadar pelengkap, melainkan fondasi tak tergantikan dalam sistem produksi pangan dan kesejahteraan manusia.

Demikian pula, serangga dekomposer atau detritivora, secara operasional adalah serangga yang memecah materi organik mati (misalnya, serangga pengurai bangkai, rayap, atau kumbang kotoran), yang menurut Coleman, Crossley, dan Hendrix (2004), berperan penting dalam siklus nutrisi dan menjaga kesuburan tanah. Pemahaman tentang interaksi kompleks antara serangga dan lingkungannya ini memungkinkan pengembangan strategi konservasi dan pemanfaatan jasa ekosistem yang berkelanjutan.

Aspek lainnya yang juga tak kalah penting dalam entomologi terapan adalah entomologi medis dan veteriner. Bidang ini secara spesifik mempelajari serangga yang bertindak sebagai vektor penyakit, yaitu organisme (dalam hal ini serangga)

yang menularkan patogen dari satu inang ke inang lain, baik manusia maupun hewan. Contoh paling umum termasuk nyamuk yang menularkan malaria, demam berdarah, dan Zika, atau kutu yang menularkan tifus. Menurut Service (2012), pemahaman mendalam tentang biologi, ekologi, dan perilaku serangga vektor ini sangat krusial untuk mengembangkan program pengendalian penyakit yang efektif, yang dapat meliputi penggunaan insektisida, pengelolaan habitat, atau intervensi genetik. Kontribusi entomologi terapan dalam menjaga kesehatan masyarakat global sangatlah signifikan.

Selain itu, entomologi permukiman juga menjadi bidang yang tak kalah penting, terutama dalam konteks urbanisasi dan peningkatan kepadatan penduduk. Bidang ini berfokus pada serangga yang hidup dan berkembang di lingkungan hunian manusia, seperti kecoa, semut, rayap, nyamuk, dan lalat, baik sebagai pengganggu maupun sebagai potensi vektor penyakit. Pengelolaan serangga permukiman memerlukan pendekatan yang terpadu, aman bagi penghuni, dan ramah lingkungan. Untuk memfasilitasi pemahaman awal mengenai serangga, aspek klasifikasi, anatomi, dan morfologi menjadi pondasi fundamental. Klasifikasi merujuk pada sistematisasi serangga ke dalam kelompok-kelompok berdasarkan kekerabatan evolusioner dan karakteristik bersama, memudahkan identifikasi dan studi. Anatomi adalah studi tentang struktur internal serangga, seperti sistem pencernaan, saraf, atau reproduksi, sementara morfologi berfokus pada struktur eksternal yang terlihat, seperti bagian mulut, antena, sayap, dan kaki. Kemajuan teknologi seperti *Augmented Reality* (*AR*) sangat relevan di sini.

Billinghurst dan Duenser (2012) menyebutkan dengan bantuan *AR* peserta didik tidak hanya melihat gambar datar, tetapi dapat menjelajahi dan mengidentifikasi bagian-bagian tubuh serangga secara interaktif dalam bentuk *3D*, memutar model, memperbesar detail mikro, atau bahkan 'membedah' secara virtual untuk melihat organ internal. Pengalaman belajar visual dan interaktif semacam ini sangat meningkatkan retensi informasi dan pemahaman konsep-konsep dasar yang kompleks, mempersiapkan peserta didik untuk studi lebih lanjut di bidang entomologi terapan.

Entomologi terapan menuntut pemahaman mendalam tentang serangga untuk solusi di bidang pertanian, kesehatan, permukiman dan konservasi. Keterbatasan visualisasi dan akses lapangan pada pembelajaran konvensional dapat diatasi signifikan melalui integrasi Pembelajaran Berbasis Proyek (*PjBL*) dan *Augmented Reality* (*AR*). Perpaduan ini memungkinkan peserta didik mengeksplorasi model *3D* serangga secara interaktif, memvisualisasikan dinamika

kompleks, dan menerapkan konsep dalam skenario virtual, sehingga menjembatani teori-praktik serta membekali keterampilan abad ke-21 yang esensial bagi pendidikan biologi dan profesi terkait.

C. PRINSIP-PRINSIP *PROJECT BASED LEARNING (PJBL)*

Project-Based Learning (PjBL) adalah model pembelajaran inovatif yang menempatkan peserta didik sebagai pusat pembelajaran melalui keterlibatan aktif dalam proyek-proyek yang relevan dan bermakna. Menurut Larmer *et al.*, (2015), karakteristik utama *PjBL* meliputi adanya pertanyaan pemicu yang menantang, investigasi otentik yang memungkinkan peserta didik mencari solusi secara mandiri, dan presentasi hasil yang mendorong komunikasi efektif. Dalam *PjBL*, peran pendidik bergeser dari penyampai informasi menjadi fasilitator dan pembimbing, sementara peserta didik berperan sebagai peneliti, pemecah masalah, dan pencipta. Bab ini akan menguraikan tahapan pelaksanaan *PjBL* yang dapat diterapkan dalam konteks entomologi, mulai dari penentuan proyek, perencanaan, pelaksanaan investigasi lapangan atau laboratorium, hingga analisis data dan penyajian temuan, memastikan peserta didik mengembangkan keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, dan kreativitas.

PjBL didasarkan pada keyakinan bahwa pembelajaran paling efektif terjadi ketika peserta didik secara aktif terlibat dalam pemecahan masalah dunia nyata. Pertanyaan pemicu yang menantang, secara operasional didefinisikan sebagai pertanyaan terbuka yang kompleks, relevan, dan memprovokasi pemikiran mendalam, menjadi titik tolak bagi setiap proyek (Savery, 2015). Menurut Barron *et al*. (1998), pertanyaan ini tidak memiliki jawaban tunggal yang mudah ditemukan, melainkan memerlukan investigasi, analisis, dan sintesis informasi dari berbagai sumber. Misalnya, dalam entomologi terapan, pertanyaan pemicu bisa berupa "Bagaimana cara efektif mengendalikan populasi kutu daun pada tanaman sayuran organik tanpa menggunakan pestisida kimia?" atau "Apa peran serangga lokal dalam menjaga kesehatan ekosistem rawa gambut?". Pertanyaan semacam ini mendorong peserta didik untuk berpikir secara kritis, merumuskan hipotesis, dan merancang strategi investigasi mereka sendiri, melampaui pembelajaran hafalan.

Investigasi otentik adalah inti dari *PjBL*. Ini berarti peserta didik tidak hanya membaca buku atau mendengarkan ceramah, tetapi secara aktif terlibat dalam proses penelitian yang menyerupai pekerjaan profesional di lapangan. Investigasi otentik, secara operasional adalah proses pencarian dan analisis informasi, data atau bukti melalui metode yang relevan dengan disiplin ilmu yang dipelajari, seringkali melibatkan kegiatan lapangan, eksperimen, wawancara, atau analisis data riil.

Menurut Bruner (1960), dalam konteks entomologi, ini bisa berarti melakukan pengamatan langsung terhadap serangga di habitat alami mereka, mengumpulkan spesimen, melakukan percobaan di laboratorium untuk menguji efektivitas agen biokontrol, atau menganalisis data populasi hama dari studi kasus. Proses ini memungkinkan peserta didik untuk membangun pengetahuan secara konstruktif dan mengembangkan keterampilan praktis yang sangat berharga di dunia kerja.

Salah satu komponen krusial dari *PjBL* adalah presentasi hasil. Presentasi hasil, secara operasional didefinisikan sebagai proses di mana peserta didik mensintesis temuan investigasi mereka dan mengomunikasikannya kepada audiens nyata (misalnya, teman sekelas, pendidik, pakar, atau komunitas) dalam format yang beragam, seperti laporan, poster ilmiah, presentasi multimedia, atau prototipe solusi. Menurut Wiggins dan McTighe (2005), aspek ini melatih keterampilan komunikasi efektif, berpikir sistematis dalam menyajikan argumen, dan kemampuan untuk menerima umpan balik. Dalam entomologi, peserta didik mungkin mempresentasikan temuan mereka tentang dampak perubahan iklim terhadap migrasi serangga, atau memamerkan model strategi pengendalian hama terpadu yang mereka kembangkan. Proses ini tidak hanya memperkuat pemahaman mereka sendiri tentang materi pelajaran, tetapi juga memungkinkan mereka untuk berbagi pengetahuan dan berkontribusi pada diskusi yang lebih luas.

Peran pendidik dalam *PjBL* bergeser secara signifikan. pendidik tidak lagi menjadi satu-satunya sumber informasi, melainkan bertindak sebagai fasilitator dan pembimbing. Menurut Brooks dan Brooks (1999), peran fasilitator dan pembimbing ini secara operasional berarti diharapkan menyediakan panduan, sumber daya, umpan balik konstruktif, serta menciptakan lingkungan belajar yang mendukung, sambil mendorong kemandirian dan inisiatif peserta didik dalam proses pembelajaran. Mereka membantu peserta didik merumuskan pertanyaan, merencanakan investigasi, mengatasi hambatan, dan merefleksikan proses belajar mereka. Sementara itu, peserta didik mengambil peran aktif sebagai peneliti, pemecah masalah, dan pencipta, yang, sejalan dengan konsep pembelajaran penemuan Bruner (1960), secara operasional berarti mereka bertanggung jawab untuk merumuskan pertanyaan penelitian, mengembangkan solusi untuk tantangan yang dihadapi, dan menghasilkan produk atau presentasi sebagai hasil dari pembelajaran mereka. Pergeseran peran ini menumbuhkan kemandirian, tanggung jawab, dan kemampuan adaptasi, keterampilan esensial yang diperlukan untuk sukses di abad ke-21.

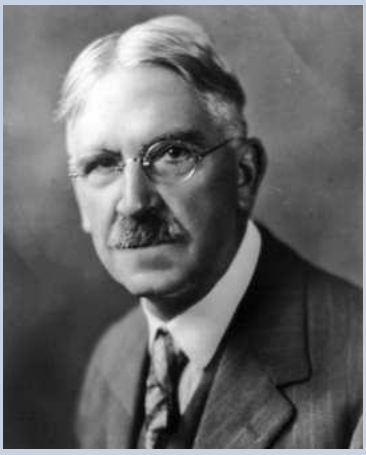
PjBL bukan sekadar metode mengajar, melainkan sebuah filosofi pendidikan yang mempersiapkan peserta didik untuk menjadi pembelajar seumur hidup yang mandiri dan kompeten. Sebagai sebuah pendekatan pembelajaran yang telah terbukti efektif, *Project-Based Learning (PjBL)* memiliki sintaks tertentu yang menjadi fondasi implementasinya. Berikut adalah penjelasan mengenai sintaks *PjBL* berdasarkan perspektif para ahli, yang akan membantu kita merancang pengalaman belajar yang bermakna.

1. *PjBL* Menurut John Dewey (1938)

Dalam konteks pembelajaran, yang didefinisikan sebagai proses perubahan perilaku atau pengetahuan yang relatif permanen sebagai hasil dari pengalaman, sintaks merujuk pada struktur atau urutan langkah-langkah terorganisir yang memandu implementasi suatu model atau strategi pembelajaran. Sintaks berfungsi sebagai "cetak biru" yang mendefinisikan pengaturan aktivitas pembelajaran, dari awal hingga akhir, guna mencapai tujuan pendidikan yang spesifik. Ia menyediakan kerangka kerja bagi pendidik untuk merancang dan melaksanakan sesi pembelajaran secara sistematis, memastikan bahwa setiap komponen pembelajaran saling terkait dan berkontribusi pada pencapaian hasil belajar yang diinginkan. Selain itu, sintaks membantu peserta didik dalam memahami alur proses pembelajaran mereka, sehingga memfasilitasi partisipasi yang lebih efektif.

Posisi sintaks dalam pembelajaran berperan sebagai penghubung antara teori pedagogis dan implementasi praktis di lingkungan kelas. Sintaks memastikan bahwa seluruh elemen esensial dari suatu model pembelajaran seperti pemberian stimulus, eksplorasi, penemuan, elaborasi, dan evaluasi—terjadi pada waktu dan urutan yang tepat. Dengan demikian, sintaks tidak hanya berfungsi sebagai panduan bagi pengajar, tetapi juga mendukung pengalaman belajar yang lebih terstruktur, terarah, dan bermakna bagi peserta didik, memfasilitasi konstruksi pengetahuan dan pengembangan keterampilan secara progresif.

Learning by doing adalah konsep pembelajaran yang dicetuskan oleh John Dewey, seorang filsuf dan tokoh pendidikan dari Amerika Serikat. Konsep ini menekankan pentingnya pengalaman langsung dan praktik dalam proses belajar, bukan hanya teori.



John Dewey (1859-1952)
(Sumber : WIkipedia)

Entomologi Terapan

Bagi Dewey pendidikan bukanlah persiapan untuk hidup, melainkan kehidupan itu sendiri.berpusat pada "*learning by doing"* atau belajar melalui pengalaman langsung menjadi inspirasi utama.

Dewey berargumen bahwa pembelajaran sejati terjadi ketika individu terlibat dalam kegiatan yang bermakna dan memecahkan masalah nyata yang relevan dengan kehidupan mereka. Pendekatan ini tidak hanya mengajar siswa "apa yang harus dipikirkan," tetapi "bagaimana cara berpikir" secara mandiri.

Sintaks *PjBL* menurut Dewey, secara implisit dapat dipahami sebagai siklus yang meliputi:

a. Mengalami Masalah (*Experience a Problem*) : peserta didik dihadapkan pada situasi atau pertanyaan yang membingungkan atau menantang.

b. Mendefinisikan Masalah (*Define the Problem) :* peserta didik secara aktif menganalisis dan merumuskan masalah.

c. Merumuskan Hipotesis atau Solusi (*Formulate Hypothesis/Solutions*) – peserta didik mengajukan ide-ide atau rencana untuk mengatasi masalah.

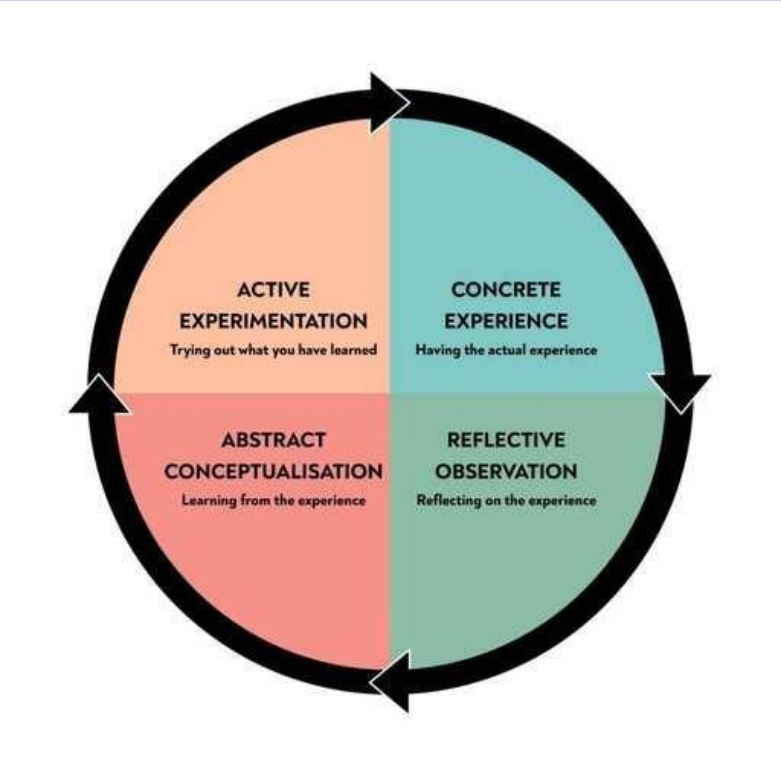
d. Menguji Hipotesis Melalui Tindakan (*Test Hypothesis Through Action)* : peserta didik melaksanakan rencana mereka melalui investigasi atau eksperimen.

e. Merefleksikan Hasil dan Penemuan Baru (*Reflect on Results and New Learnings)* : peserta didik mengevaluasi apa yang telah mereka pelajari dan hubungannya dengan pengalaman sebelumnya. Model ini menekankan inkuiri sebagai proses yang dinamis dan terintegrasi dalam pengalaman belajar.

Sintaks *PjBL* diatas meliputi pengalaman masalah, definisi, perumusan hipotesis, pengujian melalui tindakan, dan refleksi, secara intrinsik dapat merepresentasikan esensi dari teori pragmatisme John Dewey, yang menekankan bahwa pembelajaran paling efektif adalah proses dunia nyata. Sebagai contoh nyata dari *e-worksheet* tentang hama tanaman yang tanaman dapat menyisipkan *AR* yang dapat memungkinkan peserta didik memproyeksikan model *3D* serangga hama ke lingkungan sekitar mereka saat menguji hipotesis mengenai dampak hama pada tanaman. Dengan demikian, integrasi *E-Worksheet* dan *AR* tidak hanya memperkaya pengalaman belajar, tetapi juga secara sistematis membangun Digital Habits of Mind yang krusial bagi calon guru biologi di era digital.

2. *PjBL* Menurut David Kolb (1984)

Teori Pembelajaran Berpengalaman (*Experiential Learning Theory* - ELT) oleh David Kolb adalah kerangka kerja yang menjelaskan bagaimana individu belajar melalui pengalaman. *Kolb* mendefinisikan pembelajaran sebagai proses penciptaan pengetahuan melalui transformasi pengalaman, menekankan bahwa belajar bukan hanya tentang memperoleh informasi, tetapi juga bagaimana kita memproses dan mengubah pengalaman menjadi pengetahuan bermakna.



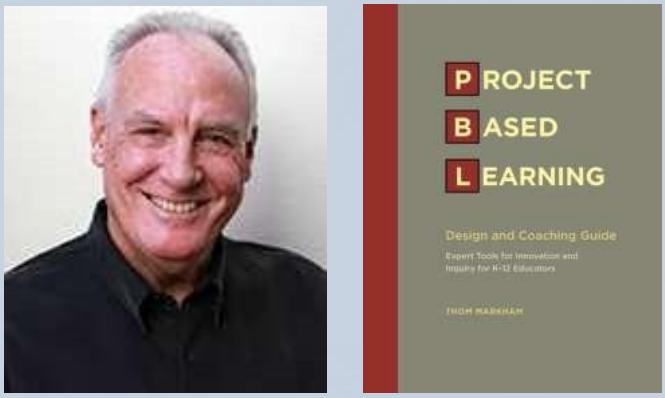
Experiential Learning Theory* oleh *Kolb
(Sumber : Kolb, 2014)

Teori ini berpusat pada siklus pembelajaran empat tahap yang saling terkait dan berkelanjutan. Dimulai dengan Pengalaman Konkret (*Concrete Experience - CE*), di mana individu terlibat dalam pengalaman langsung atau merasakan sesuatu. Selanjutnya, tahap Observasi Reflektif (*Reflective Observation - RO*) melibatkan pengamatan dan refleksi terhadap pengalaman tersebut, memikirkan apa yang terjadi dan bagaimana perasaan mereka. Setelah itu, pada tahap Konseptualisasi Abstrak (*Abstract Conceptualization - AC*), individu mulai berpikir tentang pengalaman dan observasi mereka, dan mencoba memahami pola atau teori di baliknya serta membentuk ide-ide abstrak.

Terakhir, Eksperimentasi Aktif (*Active Experimentation - AE*) melibatkan penerapan konsep atau teori yang telah dibentuk dalam situasi baru, menguji validitasnya dalam praktik.

3. *PjBL* Menurut Thomas Markham (2003)

Thomas Markham *et al* (2003) telah mengidentifikasi beberapa prinsip - prinsip utama *PjBL* yang juga dapat dianggap sebagai sintaks atau elemen penting dalam merancang proyek yang efektif dalam pembelajaran.



Thomas Markham dan Karyanya Tentang *Project Based Learning*

(Sumber : Markam *et al.*, 2003)

Adapun sintaks dari *PjBL* yang dimaksud yaitu:

a. *Centrality* (Pusat Kurikulum), artinya proyek bukan sekadar tambahan, melainkan inti dari pembelajaran konten dan keterampilan.

b. *Driving Question* (Pertanyaan Pendorong), serupa dengan pertanyaan menantang yang mengarahkan seluruh tahapan dalam pembelajaran berbasis proyek.

c. *Constructive Investigation* (Investigasi Konstruktif), di mana peserta didik secara aktif membangun pemahaman mereka melalui eksplorasi, penemuan, dan penyelesaian masalah.

d. *Autonomy* (Otonomi), yang memberikan peserta didik kendali atas proses pembelajaran dan pengambilan keputusan dalam proyek mereka.

e. *Realism* (Realistis), menekankan bahwa proyek harus relevan dengan dunia nyata dan mencerminkan tantangan yang dihadapi di luar lingkungan kelas. Meskipun tidak disajikan sebagai urutan langkah-langkah yang ketat seperti, prinsip-prinsip Markham ini menyediakan panduan kuat bagi pendidik dalam merancang dan mengevaluasi kualitas proyek, memastikan bahwa *PjBL* tidak hanya sekadar "membuat sesuatu", tetapi benar-benar memfasilitasi pembelajaran yang mendalam dan bermakna.

Entomologi Terapan

4. *PjBL* Menurut *George Lucas Educational Foundation* Dan Williams & Williams

Pembelajaran Berbasis Proyek (*PjBL*) merupakan pendekatan pedagogis yang juga dikembangkan oleh *George Lucas Educational Foundation* (2014) serta Williams & Williams (Mills & Treagust, 2003).

Pendekatan ini terdiri dari enam langkah utama yang terstruktur sebagai berikut:

a. Memulai dengan Pertanyaan Esensial (*Start With the Essential Question)*

Tahap ini diawali dengan merumuskan pertanyaan esensial yang bisa berfungsi sebagai pemicu penugasan aktivitas bagi peserta didik.

Topik yang diangkat harus relevan dengan realitas dunia nyata dan memicu investigasi mendalam. Pengajar berperan memastikan bahwa topik tersebut memiliki signifikansi bagi peserta didik.

b. Merancang Rencana Proyek (*Design a Plan for the Project*)

Perencanaan proyek dilaksanakan secara kolaboratif antara pengajar dan peserta didik. Kolaborasi ini bertujuan menumbuhkan rasa kepemilikan peserta didik terhadap proyek. Rencana tersebut mencakup penetapan aturan main, pemilihan aktivitas yang mendukung penyelesaian pertanyaan esensial melalui integrasi berbagai mata pelajaran, serta identifikasi alat dan bahan yang relevan untuk penyelesaian proyek.

c. Menyusun Jadwal (*Create a Schedule*)

Pengajar dan peserta didik bersama-sama menyusun jadwal aktivitas untuk menyelesaikan proyek. Aktivitas pada tahap ini meliputi:

1) Penyusunan linimasa proyek.
2) Penetapan batas waktu penyelesaian.
3) Mendorong peserta didik merencanakan pendekatan inovatif.
3) Membimbing peserta didik apabila rencana mereka tidak relevan.
4) Meminta peserta didik memberikan justifikasi atas pilihan metode mereka.

d. Memantau Peserta Didik dan Kemajuan Proyek (*Monitor the Students and the Progress of the Project)*

Pendidik bertanggung jawab untuk memantau aktivitas peserta didik sepanjang proses penyelesaian proyek. Pemantauan ini dilakukan dengan memfasilitasi peserta didik di setiap tahapan, sehingga pengajar berperan sebagai mentor. Untuk

mempermudah proses monitoring, dapat dibuat rubrik yang merekam seluruh aktivitas penting.

e. Mengevaluasi Hasil *(Assess the Outcome)*

Evaluasi hasil dilakukan untuk mengukur pencapaian standar proses pembelajaran, mengevaluasi kemajuan individu peserta didik, disertai memberikan umpan balik mengenai tingkat pemahaman, serta membantu pengajar dalam menyusun strategi pembelajaran berikutnya.

f. Mengevaluasi Pengalaman (*Evaluate the Experience*)

Pada akhir proses pembelajaran, pengajar dan peserta didik melakukan refleksi terhadap aktivitas dan hasil proyek, baik secara individu maupun kelompok. Pada tahap ini, peserta didik didorong untuk mengungkapkan perasaan dan pengalaman mereka selama proyek. Pengajar dan peserta didik berdiskusi untuk memperbaiki kinerja selama proses pembelajaran, yang pada akhirnya dapat menghasilkan temuan baru (*new inquiry*) untuk menjawab permasalahan yang diajukan.

5. *PjBL* Menurut Bolick (Adaptasi Dari *Buck Institute For Education)*

Buck Institute for Education (BIE), yang didirikan pada tahun 1987, adalah sebuah organisasi nirlaba terkemuka yang berbasis di California yang mendedikasikan misinya untuk memajukan Pembelajaran Berbasis *Proyek (Project-Based Learning/PBL)* di tingkat pendidikan K-12. Sejak tahun 2019, lembaga ini lebih dikenal dengan nama merek *PBLWorks* untuk lebih mencerminkan fokus praktis dan keyakinan bahwa PBL efektif dalam mentransformasi pendidikan. Sebagai pemimpin global dalam *PBL*, organisasi ini menyediakan pengembangan profesional, sumber daya, dan kerangka kerja berbasis penelitian seperti "*Gold Standard PBL*" bagi para guru dan pemimpin sekolah di seluruh dunia. Tujuannya adalah untuk memastikan semua siswa, dengan penekanan pada kesetaraan pendidikan, dapat terlibat dalam pembelajaran yang mendalam dan relevan dengan dunia nyata untuk meraih kesuksesan di perguruan tinggi, karier, dan kehidupan.

Bolick et al (2024) telah mengadaptasi kerangka konseptual *PjBL* dari elemen desain *Buck Institute for Education* yang diresapi dengan aspek-aspek pendidikan berbasis tempat, studi pelajaran, dan siswa sebagai mitra dalam pengembangan kurikulum.



Elemen *Project Based Learning* Menurut Bolick
(Sumber : Bolick *et al.*, 2024)

Adapun elemen desain *Project-Based Learning* yang dikembangkan oleh Bolick (2024) yaitu :

a. *Challenging Problem or Question (*Masalah atau Pertanyaan yang Menantang)

PjBL dimulai dengan memberikan siswa masalah atau pertanyaan yang menantang, terbuka, dan berfungsi sebagai titik awal untuk pemikiran siswa. Masalah ini harus kompleks dan membutuhkan penyelidikan berkelanjutan.

b. *Sustained Inquiry* (Inkuiri Berkelanjutan)

Proyek - proyek *PjBL* memerlukan proses inkuiri investigatif yang berulang untuk memecahkan masalah atau menjawab pertanyaan yang menantang. Ini berarti siswa akan terlibat dalam eksplorasi yang mendalam dan berkelanjutan.

c. *Authenticity* (Keaslian/Otentisitas)

Masalah atau pertanyaan yang diberikan kepada siswa harus realistis dan memiliki konteks dunia nyata. Ini berarti siswa dapat melihat dampak nyata dari pekerjaan mereka dan menghubungkan proyek dengan kehidupan mereka.

d. *Student Voice and Choice* (Suara dan Pilihan Siswa)

Siswa didorong untuk membuat keputusan sendiri dan menjadi "produsen pengetahuan." Ini melibatkan siswa dalam proses pengambilan keputusan dan hasil pembelajaran, serta memungkinkan mereka untuk memasukkan pengetahuan dari luar.

e. *Reflection* (Refleksi)

Siswa terlibat dalam proses refleksi untuk memikirkan pembelajaran mereka, apa yang berhasil, dan apa yang perlu ditingkatkan.

f. *Critique and Revision* (Kritik dan Revisi)

Proyek melibatkan proses berulang dari kritik dan revisi. Siswa menerima umpan balik dan menggunakan umpan baliktersebut untuk memperbaiki pekerjaan mereka.

g. *Public Product* (Produk Publik)

Puncak dari proyek adalah menghasilkan produk publik. Ini bisa berupa presentasi, pameran, atau sesuatu yang dibagikan kepada audiens di luar kelas.

Secara umum, konsep *PjBL* oleh Bolick sejatinya berpusat pada serangkaian elemen desain yang saling berinteraksi. Interaksi ini bertujuan untuk menciptakan pengalaman belajar yang mendalam dan bermakna bagi peserta didik, didorong oleh masalah-masalah nyata dan partisipasi aktif mereka. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada hasil akhir, tetapi juga pada proses di mana siswa membangun pemahaman dan keterampilan melalui kolaborasi dan refleksi. Dengan demikian, model *PjBL* Bolick berfungsi sebagai kerangka kerja yang fleksibel, memungkinkan pendidik untuk merancang pembelajaran yang relevan, menantang, dan transformatif.

6. *PjBL* Menurut Abdul Majid (2014)

Menurut Abdul Majid (2014), *PjBL* memiliki beberapa ciri khas yang membedakannya, antara lain:

a) Peserta didik mengambil keputusan mengenai struktur atau alur kerja proyek mereka.

b) Terdapat isu atau rintangan yang diberikan kepada peserta didik untuk dipecahkan.

c) Peserta didik merancang langkah-langkah untuk menemukan penyelesaian terhadap isu atau rintangan tersebut.

d) Peserta didik bersama-sama memikul tanggung jawab untuk mengakses dan mengelola data atau informasi demi mencari solusi masalah.

e) Penilaian berlangsung terus-menerus sepanjang proses proyek.

f) Peserta didik secara rutin merenungkan atau melakukan refleksi atas kegiatan yang sudah mereka lakukan.

g) Kualitas hasil akhir dari aktivitas belajar peserta didik akan dinilai secara kualitatif.

h) Lingkungan pembelajaran sangat terbuka terhadap kekeliruan dan penyesuaian.

Majid juga membagi proses pembelajaran *PjBL* meliputi beberapa tahapan esensial, yaitu:

a) Penentuan pertanyaan mendasar (*Start With the Essential Question*)

Awal pembelajaran ditandai dengan mengajukan pertanyaan inti yang memandu peserta didik untuk terlibat dalam berbagai aktivitas. Pertanyaan ini sebaiknya terkait dengan dunia nyata dan mendorong penyelidikan mendalam. Pendidik memiliki peran penting dalam memastikan topik yang diangkat relevan. dengan minat dan pengalaman peserta didik.

b) Mendesain perencanaan proyek (*Design a Plan for the Project)*

Tahap ini melibatkan penyusunan rencana proyek secara kolaboratif antara pendidik dan peserta didik. Tujuannya adalah agar peserta didik merasa memiliki proyek tersebut. Perencanaan ini mencakup penetapan aturan main, pemilihan kegiatan yang mendukung pencarian jawaban atas pertanyaan inti, penggabungan berbagai disiplin ilmu, serta identifikasi alat dan bahan yang diperlukan untuk menyelesaikan proyek.

c) Menyusun Jadwal (*Create a Schedule*)

Pendidik dan peserta didik secara bersama-sama menyusun lini masa untuk penyelesaian proyek. Aktivitas pada fase ini mencakup:

- Menentukan batas waktu pengerjaan proyek secara keseluruhan.
- Membangun tenggat waktu untuk setiap bagian proyek.
- Mendorong peserta didik untuk mengeksplorasi metode baru.
- Memberikan panduan kepada peserta didik jika mereka menyimpang dari fokus proyek.
- Meminta peserta didik untuk menjelaskan alasan di balik pilihan pendekatan mereka.

d) Memonitor Peserta didik dan kemajuan proyek *(Monitor the Students and the Progress of the Project)*

Pendidik bertanggung jawab memantau aktivitas peserta didik selama menyelesaikan proyek. Pemantauan ini dilakukan dengan memberikan dukungan dan bimbingan pada setiap tahapan. Pendidik bertindak sebagai mentor bagi aktivitas peserta didik. Dengan demikian, peran pendidik berubah dari sekadar penyampai materi menjadi fasilitator yang membimbing peserta didik menuju kemandirian belajar. Untuk memudahkan proses ini, dibuatlah instrumen penilaian

(rubrik) yang dapat merekam keseluruhan aktivitas yang penting.

e) Menguji hasil (*Assess the Outcome*)

Penilaian pada tahap ini bertujuan membantu pendidik dalam mengukur pencapaian standar, mengevaluasi perkembangan masing-masing peserta didik, memberikan umpan balik tentang tingkat pemahaman yang sudah dicapai peserta didik, dan membantu pendidik dalam merancang strategi pembelajaran berikutnya.

f) Mengevaluasi pengalaman (*Evaluate the Experience)*

Pada akhir proses pembelajaran, pendidik dan peserta didik melakukan refleksi terhadap aktivitas dan hasil proyek yang sudah dijalankan. Proses refleksi dilakukan baik secara individu maupun kelompok. Pada tahap ini peserta didik diminta untuk menyampaikan perasaan dan pengalaman selama menyelesaikan proyek. Diskusi antara pendidik dan peserta didik bertujuan untuk meningkatkan kinerja di masa depan, yang pada akhirnya dapat menghasilkan penemuan baru dalam menjawab masalah awal pembelajaran.

D. Teknologi *Augmented Reality (AR)* Dalam Pembelajaran

Augmented Reality (AR) adalah teknologi yang menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital, menciptakan pengalaman interaktif secara real-time. Menurut Milgram dan Kishino (1995), *AR* menempati posisi unik dalam '*kontinuum realitas-virtualitas*' di mana elemen virtual ditambahkan ke lingkungan nyata secara langsung, berbeda dari *Virtual Reality* yang berupa lingkungan *virtual* sepenuhnya.



Visual *AR* & *VR*
(Sumber : Youtube CL Dr. Khartika)





nyata.

Dalam pembelajaran, *AR* menawarkan manfaat luar biasa, terutama dalam memahami struktur kompleks seperti morfologi serangga. Melalui *AR*, peserta didik dapat memvisualisasikan model *3D* serangga, memutar, memperbesar, bahkan berinteraksi dengan bagian-bagian tubuhnya seolah-olah objek tersebut ada di depan mereka. Menurut Radu (2014), pengalaman ini memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam dan retensi informasi yang lebih baik, karena interaktivitas visual mendorong eksplorasi aktif. Bab ini akan membahas pengertian dan jenis-jenis *AR*, serta mengidentifikasi beberapa aplikasi atau framework *AR* yang relevan dan digunakan dalam pengembangan *E-Worksheet* ini, seperti *Unity* atau *Zappar*, yang memungkinkan penciptaan pengalaman belajar yang imersif dan mendalam.

Untuk memahami potensi penuh *AR*, penting untuk mengidentifikasi elemen-elemen kunci yang membentuk pengalaman augmented reality yang efektif. Pertama, kombinasi dunia nyata dan virtual adalah ciri khas utama *AR*. Ini berarti bahwa elemen digital ditumpangkan pada pandangan langsung pengguna terhadap lingkungan fisik, tidak menggantikannya. Kedua, interaksi real-time memastikan bahwa elemen *virtual* merespons perubahan posisi atau orientasi pengguna secara instan, menciptakan ilusi bahwa objek digital tersebut benar-benar ada di ruang fisik. Ketiga, pendaftaran *3D* yang akurat adalah kemampuan sistem *AR* untuk secara tepat menempatkan dan menjaga posisi objek *virtual* di

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

relatif terhadap objek di dunia nyata, bahkan ketika pengguna bergerak. Ketiga elemen ini bekerja sama untuk menciptakan pengalaman *AR* yang meyakinkan dan imersif, yang secara signifikan dapat meningkatkan keterlibatan dan pemahaman dalam konteks pendidikan, khususnya untuk topik yang memerlukan visualisasi spasial.

Dalam konteks pembelajaran, aplikasi *AR* dapat dikategorikan berdasarkan cara mereka mengenali dan berinteraksi dengan lingkungan fisik. Salah satu jenis utama adalah *Marker-Based AR* (*AR* Berbasis Penanda). *Marker-Based AR*, secara operasional didefinisikan sebagai jenis *AR* yang menggunakan gambar atau objek pradefinisi (disebut marker atau penanda, seringkali berupa kode *QR* atau *pattern* spesifik) untuk memicu dan menempatkan konten virtual. Ketika kamera perangkat *AR* mendeteksi *marker* ini, konten *3D* yang terkait akan langsung muncul dan 'menempel' pada posisi marker tersebut di dunia nyata. Menurut Antonioli *et al* (2014), keunggulan jenis *AR* ini adalah akurasi penempatan yang tinggi dan implementasi yang relatif mudah, membuatnya ideal untuk *e-worksheet* di mana marker dapat dicetak pada lembar kerja dan digunakan sebagai titik jangkar untuk model serangga *3D*. Misalnya, sebuah marker dapat dicetak di samping gambar serangga *2D* pada lembar kerja, dan ketika dipindai, model *3D* serangga tersebut akan muncul di atasnya.

Jenis lain yang semakin populer adalah *Markerless AR (AR* Tanpa Penanda). *Markerless AR*, secara operasional adalah jenis *AR* yang mampu menempatkan objek virtual di lingkungan nyata tanpa memerlukan marker fisik, melainkan mengandalkan algoritma canggih seperti *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping*) untuk menganalisis fitur-fitur lingkungan, mendeteksi permukaan datar, dan melacak gerakan perangkat. Menurut Akçayır dan Akçayır (2017), keunggulan utamanya adalah fleksibilitas yang lebih besar, karena pengguna dapat memproyeksikan objek virtual di mana saja di lingkungan mereka, seperti di atas meja atau lantai. Meskipun lebih kompleks dalam pengembangan dan membutuhkan daya komputasi yang lebih tinggi, *Markerless AR* memberikan pengalaman yang lebih bebas dan eksploratif, memungkinkan peserta didik untuk meletakkan model serangga *3D* di berbagai konteks untuk studi yang lebih mendalam, seperti mengamati serangga di habitat virtual yang ditempatkan di ruang kelas. Pengembangan aplikasi *AR* memerlukan *platform* atau *framework* khusus. Dua di antaranya yang sangat relevan dan banyak digunakan dalam pengembangan *e-worksheet* berbasis *AR* adalah *Unity* dan *Zappar* (Ziden et al.,

2022; Dewi & Kuswanto, 2023).

Menurut Kim *et al* (2016), *Unity* adalah *game engine* dan *development platform* lintas *platform* yang kuat, dilengkapi dengan *SDK* (*Software Development Kit*) *AR* seperti *AR Foundation* (mendukung *ARKit* dan *ARCore*) atau *Vuforia*, memungkinkan pengembang untuk membangun aplikasi *AR* yang kompleks dengan model *3D* interaktif, animasi, dan *user interface* yang kaya. Lebih lanjut, Van Der Woude *et al* (2024) juga menekankan bahwa fleksibilitas *Unity* menjadikannya pilihan yang ideal untuk menciptakan pengalaman pembelajaran entomologi yang mendalam, di mana detail morfologi dan siklus hidup serangga dapat divisualisasikan dengan presisi tinggi.



Unity 3D AR Foundation
(Sumber : *Youtube* Dilmer Valecillos)



AR Zappar
(Sumber : *Future Media Hub*)

Sementara itu, *Zappar* menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dan cepat untuk pengembangan *AR*, khususnya untuk konten berbasis marker. *Zappar*, secara operasional adalah platform pengembangan *AR* yang berfokus pada kemudahan penggunaan, memungkinkan penciptaan pengalaman *AR* interaktif yang dapat diakses melalui aplikasi reader mereka atau *web AR*. Menurut Lee (2012), platform ini ideal untuk *e-worksheet* di mana marker sederhana dapat memicu pengalaman *AR* yang telah ditentukan, seperti menampilkan model *3D* serangga atau video edukasi singkat saat marker dipindai.

Integrasi pada kedua platform ini dalam pengembangan *e-worksheet* untuk pembelajaran entomologi terapan memungkinkan pemanfaatan kekuatan masing-masing. *Unity* untuk simulasi yang lebih mendalam dan interaktif, sementara *Zappar* untuk aksesibilitas dan kemudahan implementasi konten *AR* cepat yang terpasang pada materi cetak. Penggunaan teknologi ini secara strategis akan memperkaya pengalaman belajar, menjadikan entomologi terapan lebih hidup dan mudah diakses oleh peserta didik.

E. Integrasi *PjBL*, *AR*, Dan *E-Worksheet*

Pendidikan abad ke-21 menuntut pendekatan inovatif yang relevan dengan kemajuan teknologi, terutama dalam bidang sains seperti entomologi, yang memerlukan visualisasi dan interaksi yang mendalam. Integrasi *Project-Based Learning (PjBL)* dengan *Augmented Reality (AR)* melalui *E-Worksheet* menciptakan sinergi yang kuat untuk pembelajaran entomologi terapan yang efektif. *E-Worksheet* berfungsi sebagai platform digital yang memfasilitasi seluruh proses *PjBL*, mulai dari pengenalan pertanyaan pemicu, panduan investigasi, hingga ruang untuk dokumentasi dan presentasi hasil. Menurut Johnson, *et* al (2012), dalam konteks ini, *AR* disisipkan sebagai alat bantu visualisasi dan interaksi yang memperkaya tahapan investigasi dan analisis. Misalnya, peserta didik dapat menggunakan *AR* untuk mengidentifikasi spesies serangga di lapangan, mempelajari siklus hidupnya melalui model *3D* interaktif, atau bahkan mensimulasikan dampak pengendalian hama.

Bab ini akan menyajikan pemetaan proses *PjBL* ke dalam format *E-Worksheet*, memberikan contoh aktivitas entomologi berbasis proyek yang didukung *AR*, serta menyajikan studi singkat berupa skenario pembelajaran yang menggambarkan bagaimana *E-Worksheet* yang diperkaya *AR* dapat diterapkan secara praktis di kelas biologi. Konsep *E-Worksheet* dalam konteks ini tidak hanya sekadar lembar kerja digital biasa. Secara operasional, *E-Worksheet* didefinisikan sebagai dokumen digital interaktif yang terintegrasi dengan elemen multimedia (teks, gambar, video, audio) dan teknologi imersif (seperti *AR*), dirancang untuk memandu peserta didik melalui serangkaian tugas berbasis proyek, memungkinkan mereka untuk mencatat, menganalisis, dan menyajikan data secara digital.

Menurut Reigeluth (2013), fungsi *E-Worksheet* ini adalah sebagai pusat kendali atau dashboard bagi peserta didik, tempat mereka mengakses instruksi proyek, tautan ke sumber daya eksternal (misalnya, database serangga online, video tutorial), template untuk pengumpulan data, serta placeholder untuk menyisipkan hasil kerja mereka. Selanjutnya, Jonassen (1999) menegaskan bahwa lingkungan belajar yang sekiranya mendukung konstruksi pengetahuan aktif seperti *E-Worksheet* ini sangat penting untuk pembelajaran yang bermakna. Fleksibilitas format digital ini memungkinkan pembaruan konten yang dinamis dan penyediaan umpan balik yang cepat dari pendidik, jauh melampaui batasan lembar kerja cetak tradisional. Dengan demikian, diharapkan dapat meningkatkan kemampuan peserta didik dalam berpikir kritis fan kreatif secara mandiri.

Aplikasi *AR* yang tersemat dapat memindai serangga yang ditemukan dan menumpangkan informasi digital—seperti nama spesies, klasifikasi, atau karakteristik unikdan langsung pada *live view* kamera. Ini menghilangkan kebutuhan akan buku identifikasi fisik yang tebal dan mempercepat proses pembelajaran. Lebih lanjut, untuk studi di dalam kelas, model *3D* serangga dengan visualisasi *AR* interaktif memungkinkan peserta didik untuk "membongkar" anatomi serangga lapis demi lapis, melihat organ internal, atau mengamati siklus hidup metamorfosis secara dinamis, sebuah pengalaman yang tidak mungkin didapatkan dari gambar *2D*.

Selain identifikasi dan morfologi, *AR* juga dapat digunakan untuk simulasi kompleks dalam *E-Worksheet* berbasis proyek. Bayangkan sebuah proyek tentang pengendalian hama: peserta didik dapat menggunakan *AR* untuk mensimulasikan penyebaran hama di lahan pertanian virtual yang diproyeksikan ke meja mereka, kemudian menguji berbagai skenario pengendalian hama (misalnya, pelepasan predator alami atau aplikasi biopestisida) dan secara visual melihat dampak dari setiap tindakan.

Simulasi *AR* secara operasional didefinisikan sebagai representasi *virtual* yang dinamis dan interaktif dari suatu fenomena atau proses dunia nyata, memungkinkan peserta didik bereksperimen dengan variabel dan mengamati hasilnya tanpa risiko atau biaya dari percobaan fisik. Menurut Aldrich (2009), hal ini memupuk kemampuan berpikir sistematis, pemecahan masalah prediktif, dan pengambilan keputusan berdasarkan data. Lebih lanjut, Prensky (2001) juga menegaskan bahwa simulasi interaktif semacam ini sangat krusial dalam mengembangkan keterampilan analitis dan cara strategis yang esensial dalam entomologi terapan.

E-Worksheet adalah lembar kerja elektronik interaktif yang dirancang untuk memfasilitasi proses belajar mengajar. Komponen-komponen inti sistematis dapat memastikan *E-Worksheet* berfungsi secara efektif, terutama dalam konteks pembelajaran berbasis proyek *(PjBL)* dengan *Augmented Reality (AR)* seperti pada materi entomologi terapan. Adapun komponen-komponen tersebut yaitu sebagai berikut:

a. *Pre-test*

1) Definisi : Bagian awal *E-Worksheet* yang berisi serangkaian soal evaluasi untuk mengukur pemahaman awal atau pengetahuan prasyarat peserta didik sebelum mempelajari materi utama. Dalam *E-Worksheet* ini digunakan soal untuk

evaluasi kemampuan *Digital habits of mind.*

2) Ciri/Syarat : Soal sesuai dengan kompetensi dan Sub-CPMK/tujuan pembelajaran yang akan dicapai. Dapat berupa soal-soal pilihan ganda atau esai singkat. Tujuannya untuk memetakan pengetahuan awal peserta didik dan membantu pendidik menyesuaikan pembelajaran.

3) Contoh : Pilihan Ganda: "Jenis serangga apakah yang mengalami metamorfosis sempurna?".; Esai: "Jelaskan perbedaan antara hama dan vektor penyakit pada tanaman".

b. Tujuan Pembelajaran

1) Definisi: Bagian yang menjelaskan secara spesifik apa yang diharapkan peserta didik capai setelah menyelesaikan *E-Worksheet,* serta panduan langkah demi langkah cara menggunakan *E-Worksheet* tersebut.

2) Ciri/Syarat: Tujuan Pembelajaran harus jelas, terukur, dan spesifik, mencakup aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik jika relevan.

3) Contoh : Setelah mempelajari *E-Worksheet* ini, peserta didik mampu mengidentifikasi morfologi serangga Ordo Hymenoptera dengan menggunakan fitur *AR*

c. Petunjuk *E-Worksheet*

1`) Definisi : petunjuk penggunaan yang harus mudah dipahami, ringkas, dan mencakup informasi tentang penggunaan fitur interaktif (misalnya, fitur *AR*).

2) Ciri/Syarat : harus mudah dipahami, ringkas, dan harus mencakup nformasi tentang penggunaan fitur interaktif (misalnya, fitur *AR*).

3) Contoh: "Pindai *QR* code pada halaman 'Kegiatan Pembelajaran' untuk mengaktifkan model *3D* serangga. Jawab pertanyaan-pertanyaan yang diberikan setelah mengamati model tersebut."

d. Pendahuluan

1) Definisi: Bagian pembuka yang berfungsi untuk menarik minat peserta didik, memberikan gambaran umum tentang topik yang akan dipelajari, dan mengaitkan materi dengan konteks kehidupan nyata atau relevansi studi.

2) Ciri/Syarat: Menarik perhatian peserta didik, bisa berupa pertanyaan pemantik, cerita singkat, atau fenomena terkait entomologi; Memberikan konteks dan relevansi materi; Singkat, padat, dan tidak terlalu banyak teori.

3) Contoh: "Pernahkah Anda bertanya mengapa ada serangga yang dapat

4) menguntungkan dan ada pula yang merugikan bagi manusia dan pertanian? Dalam *E-Worksheet* ini, kita akan peranan serangga dalam ekosistem, khususnya dalam konteks entomologi terapan."

e. Materi Pembelajaran (Spesifik Setiap Konsep dalam Entomologi Terapan)

Definisi: Inti dari *E-Worksheet* yang menyajikan konten pengetahuan secara terstruktur dan mendalam, dipecah menjadi konsep-konsep spesifik dalam entomologi terapan.

Ciri/Syarat: Konten akurat, relevan, dan mutakhir; Disajikan secara interaktif (misalnya, melalui teks, gambar, video, animasi, atau integrasi *AR)*; Setiap konsep dijelaskan secara spesifik (misalnya, morfologi serangga, klasifikasi, siklus hidup, peran ekologis, metode pengendalian hama); Desain visual yang menarik dan mudah dibaca.

Contoh:

1) Konsep 1: Morfologi Serangga Utama: berisi penjelasan tentang kepala, toraks, abdomen, serta fitur spesifik seperti antena, sayap, dan kaki. Dilengkapi dengan gambar interaktif dan potensi model *AR*.

2) Konsep 2: Ordo-ordo Serangga Penting: berisi deskripsi ordo-ordo serangga yang relevan dalam entomologi terapan (misalnya, pada Coleoptera, Lepidoptera, Hymenoptera, Diptera) beserta ciri-ciri khas dan contoh spesies.

f. Kegiatan Pembelajaran (LKPD)

Berisi Soal-soal Pertanyaan Kegiatan Peserta Didik Sesuai Sintaks *PjBL* Berbasis *AR* Entomologi Terapan)

1) Definisi: Bagian yang paling interaktif dan berpusat pada peserta didik, berisi lembar kerja peserta didik (LKPD) yang membimbing mereka melalui serangkaian aktivitas sesuai sintaks *PjBL (Project Based Learning)* dan memanfaatkan teknologi *AR*.

2) Ciri/Syarat: Soal-soal atau instruksi kegiatan sesuai dengan sintaks *PjBL* (misalnya, penentuan pertanyaan dasar, mendesain perencanaan proyek, menyusun jadwal, memantau kemajuan proyek, menguji hasil, mengevaluasi pengalaman); Mengintegrasikan penggunaan *AR* untuk eksplorasi dan pemahaman konsep (misalnya, mengidentifikasi bagian serangga pada model *AR 3D*, mengamati perilaku serangga *virtual*); Mendorong pemikiran kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah; Bisa berupa pertanyaan pengamatan, analisis kasus, atau instruksi untuk membuat suatu produk (misalnya, diagram siklus hidup serangga).

3) Contoh: Sintaks *PjBL* - Penentuan Pertanyaan Dasar: "Amati model *AR* belalang di hadapan Anda. Berdasarkan pengamatan, apa fungsi utama bagian-bagian tubuh belalang yang berbeda?"; Sintaks *PjBL* - Mendesain Perencanaan Proyek: "Bayangkan Anda adalah seorang entomolog. Buatlah rencana proyek mini untuk mengidentifikasi jenis serangga hama pada tanaman tomat di kebun sekolah Anda, dengan memanfaatkan aplikasi *AR* yang relevan."; Kegiatan Eksplorasi *AR*: "Gunakan fitur *AR* untuk mengamati siklus hidup kupu-kupu secara *virtual*. Gambarlah tahapan metamorfosisnya dan jelaskan perubahan yang terjadi pada setiap tahap."

g. Daftar Pustaka

1) Definisi: Bagian yang mencantumkan semua sumber informasi (buku, jurnal, situs web, artikel) yang digunakan dalam penyusunan *E-Worksheet*.

2) Ciri/Syarat: Lengkap dan akurat; Mengikuti format sitasi yang konsisten (misalnya, *APA, MLA, Chicago*); Menunjukkan kredibilitas dan memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk mendalami materi lebih lanjut.

3) Contoh: Borror, D. J., Triplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (1989). *An introduction to the study of insects*. Saunders College Publishing. ;

4) Format: gaya *APA* (*American Psychological Association*) [Nama Penulis/Organisasi]. (Tahun). Judul Artikel/Halaman Web. Diambil dari [URL].

h. *Post-test*

5) Definisi: Evaluasi akhir yang disajikan setelah peserta didik menyelesaikan seluruh materi dan kegiatan pembelajaran, untuk mengukur pencapaian tujuan pembelajaran.

6) Ciri/Syarat: Soal sesuai dengan kompetensi dan Sub-CPMK/tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan; Dapat berupa soal pilihan ganda atau esai yang lebih kompleks, menguji pemahaman konsep dan kemampuan analisis; Mencerminkan jenis soal pada pre-test namun dengan tingkat kedalaman yang sesuai dengan materi yang telah dipelajari.

8) Contoh: Pilihan Ganda: "Berikut adalah salah satu contoh serangga yang berperan sebagai penyerbuk utama dalam ekosistem pertanian, kecuali..."; Esai: "Analisis dan bandingkan dua metode pengendalian hama serangga yang berbeda, serta berikan rekomendasi metode mana yang paling efektif untuk kasus pertanian organik, dengan mempertimbangkan dampak lingkungan."

Dengan struktur komponen ini, *E-Worksheet* akan menjadi alat pembelajaran yang komprehensif, interaktif, dan efektif untuk materi entomologi terapan berbasis *AR* dengan pendekatan *PjBL*. Pemetaan proses *PjBL* ke dalam format *E-Worksheet* melibatkan strukturisasi *E-Worksheet* agar secara logis mengikuti alur proyek. Ini mencakup bagian-bagian seperti:

1) Pengantar Proyek dan Pertanyaan Pemicu;

2) Panduan Riset dan Pengumpulan Data (dengan tautan ke sumber daya *AR* untuk identifikasi atau model *3D*);

3) Ruang untuk Analisis Data dan Refleksi (peserta didik dapat menyisipkan tangkapan layar dari simulasi *AR* atau anotasi pada model *3D*);

4) Bagian untuk Pengembangan Produk/Solusi; dan

5) Area untuk Presentasi Hasil (dengan fitur unggah video atau presentasi *AR*). Setiap tahapan ini diperkaya dengan *QR* code atau marker *AR* yang relevan, memicu pengalaman interaktif yang sesuai dengan kebutuhan investigasi.

Sebagai contoh skenario pembelajaran, dalam proyek berjudul "Analisis Peran Penyerbuk Lokal", *E-Worksheet* dapat memandu peserta didik untuk:

1) Memindai marker *AR* di taman sekolah untuk mengidentifikasi spesies serangga penyerbuk melalui model *3D* interaktif yang muncul di ponsel mereka;

2) Mencatat data kunjungan serangga ke berbagai bunga menggunakan form digital dalam *E-Worksheet*;

3) Menggunakan *AR* untuk melihat siklus hidup lebah madu secara detail dan mengidentifikasi spesies tertentu melalui model *3D*;



Model *3D* Siklus Hidup Lebah Madu
(Sumber : *Boycraft*

4) Menganalisis data yang terkumpul dan menyusun kesimpulan di bagian laporan *E-Worksheet*; dan

5) Mempersiapkan presentasi akhir mereka yang dapat mencakup video timelapse *AR* dari kunjungan serangga atau model *3D* serangga penyerbuk utama yang dapat dieksplorasi audiens menggunakan perangkat mereka. Pendekatan ini tidak hanya membuat pembelajaran entomologi lebih menarik dan relevan, tetapi juga membekali peserta didik dengan kompetensi digital dan analitis yang esensial untuk masa depan.

Bab ini telah menguraikan landasan teoretis dan konseptual yang fundamental bagi pengembangan *E-worksheet Project-Based Learning (PjBL)* berbasis *Augmented Reality (AR)* dalam lingkup pendidikan entomologi terapan. Pembahasan mendalam telah mencakup urgensi studi entomologi, relevansi *PjBL* sebagai pendekatan pedagogis yang berpusat pada peserta didik, serta potensi transformatif teknologi *AR* dalam memvisualisasikan dan memfasilitasi pemahaman atas konsep-konsep yang kompleks. Integrasi sinergis antara ketiga elemen ini diharapkan mampu menciptakan pengalaman belajar yang tidak hanya interaktif, melainkan juga mendalam dan sangat relevan, membekali peserta didik dengan pemahaman aplikatif terhadap ilmu serangga.

Tujuan utama dalam memahami secara mendalam konsep-konsep yang dipaparkan dalam bab ini akan menjadi fondasi esensial untuk delapan bab selanjutnya. Bab-bab berikutnya akan mengelaborasi lebih rinci contoh konsep entomologi terapan dalam bentuk implementasi *E-worksheet PjBL* berbasis *AR*. Untuk mengukur dan mengkonsolidasikan pemahaman awal peserta didik, bab-bab tersebut juga dapat diakhiri dengan penyajian soal pilihan ganda atau kuis *AR* interaktif yang dirancang khusus untuk meninjau teori-teori kunci yang telah dibahas. Supaya dapat memastikan peserta didik memiliki kesiapan memadai untuk melanjutkan dan mendalami materi pada bab-bab selanjutnya.

BAB II

"Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga"

Serangga : Lebah madu (Apis mellifera)



A. PETUNJUK
E-WORKSHEET

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami **peran serangga polinator.** Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan E-worksheet ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan pretest terlebih dahulu. Pretest ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet.* Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep **Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga.**
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi AR yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest.* Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. PRETEST (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti pretest singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.



SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga Lebah madu (*Apis mellifera*)
Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik dapat menyebutkan bagian morfologi lebah yang berperan dalam proses penyerbukan.
2. Peserta didik dapat menjelaskan hubungan antara siklus hidup lebah dengan proses penyerbukan
3. Peserta didik dapat mengidentifikasi tanaman berbunga yang bergantung pada lebah untuk proses reproduksi
4. Peserta didik dapat menganalisis mekanisme penyerbukan oleh lebah dan dampaknya terhadap kelangsungan tanaman.
5. Peserta didik dapat mengevaluasi pentingnya peran lebah dalam ekosistem dan dampak berkurangnya populasi lebah
6. Peserta didik dapat mendesain solusi untuk menjaga populasi lebah sebagai penyerbuk alami

Alat dan Bahan :

- PC atau laptop atau Gawai
- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*
Metode Pembelajaran :

- Simulasi
- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. PENDAHULUAN

Selamat Datang di *E-Worksheet* Entomologi *PjBL* Berbasis *AR*:
Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga

Lembar kerja ini dirancang untuk membantumu memahami konsep entomologi secara mendalam melalui kegiatan pembelajaran yang interaktif dan menantang. Dengan pendekatan *Project-Based Learning (PjBL),* anda akan diajak menganalisis permasalahan nyata, berpikir kritis, dan merencanakan proyek untuk menemukan solusi berdasarkan pemahaman ilmiah. Mari eksplorasi materi ini dengan semangat dan rasa ingin tahu, karena belajar akan lebih bermakna ketika anda terlibat secara aktif dalam prosesnya. Fokus utama kita kali ini adalah memahami salah satu peran ekologis serangga yang paling vital, yaitu penyerbukan.

Penyerbukan sendiri adalah proses pemindahan butir serbuk sari dari kepala sari *(anther)* ke kepala putik *(stigma)* bunga, yang memungkinkan terjadinya pembuahan dan pembentukan biji (Shankar et al., 2016). Proses penting ini dapat terjadi melalui berbagai agen, termasuk angin, air, serangga, burung, kelelawar, dan hewan lainnya. Dalam konteks pertanian, penyerbukan oleh hewan terbukti secara signifikan meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen, seperti pada tanaman apel, stroberi, dan kopi, serta berperan besar dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Oleh karena itu, memahami mekanisme dan agen penyerbukan sangat krusial, terutama peran serangga sebagai polinator utama. Jenis polinasi terbagi berdasarkan asal serbuk sarinya, yang meliputi: penyerbukan sendiri (autogami), penyerbukan tetangga (geitonogami), ; penyerbukan silang (xenogami atau alogami), dan penyerbukan bastar (hybridogami), di mana serbuk sari berasal dari tumbuhan lain yang berbeda jenis. Sedangkan jenis polinasi berdasarkan perantara dibedakan menjadi anemofili, ornitofili, kiropterofili, malakofili, hidrofili, dan antrofili.

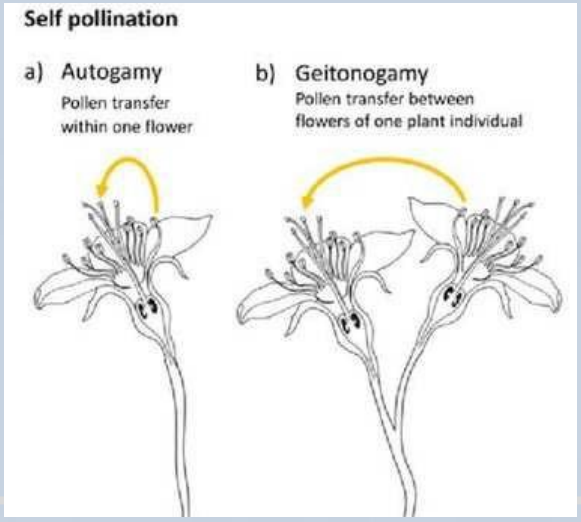
E. MATERI SINGKAT 1

1. Jenis-Jenis Penyerbukan

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

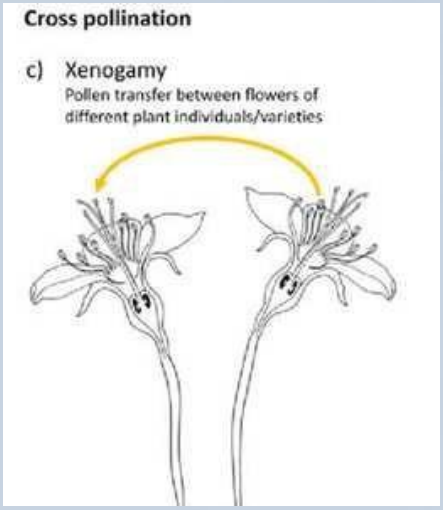
a. Penyerbukan sendiri (*autogami*) adalah mekanisme penyerbukan di mana serbuk sari jatuh ke kepala putik bunga itu sendiri. Proses ini terjadi pada bunga yang memiliki kedua alat kelamin jantan (benang sari) dan betina (putik) dalam satu bunga yang sama, sering disebut sebagai bunga sempurna. Secara 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*) 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.



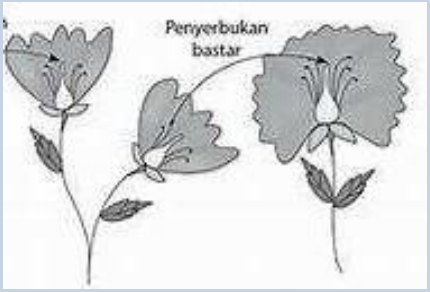
Penyerbukan Sendiri (Autogami)
(Sumber: Klein, 2020)

c. Penyerbukan silang (*xenogami*/*allogami*) 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.



Penyerbukan Silang (*Cross polination)*
(Sumber: Klein, 2020)

d. Penyerbukan bastar (*hibridogami*) 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.



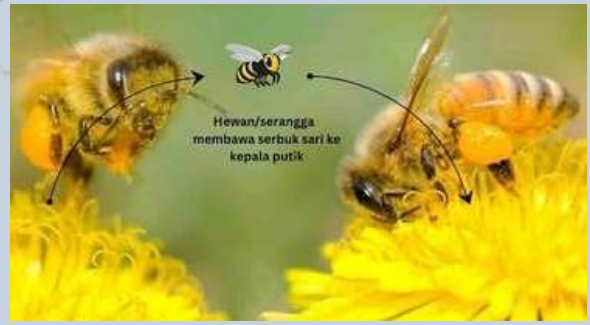
Penyerbukan Bastar (Hibridogami)
(Sumber: kibrispdr.org)

Entomologi Terapan

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.



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.



Ornitofili
(Sumber: generacionverde.com)

Entomologi Terapan

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.



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.



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.

Entomologi Terapan

F. MATERI SINGKAT 2

1. Lebah Madu (*Apis mellifera*)

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*.



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

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



3 Contoh Lebah Genus Apis
(Sumber: Bees4life*)*

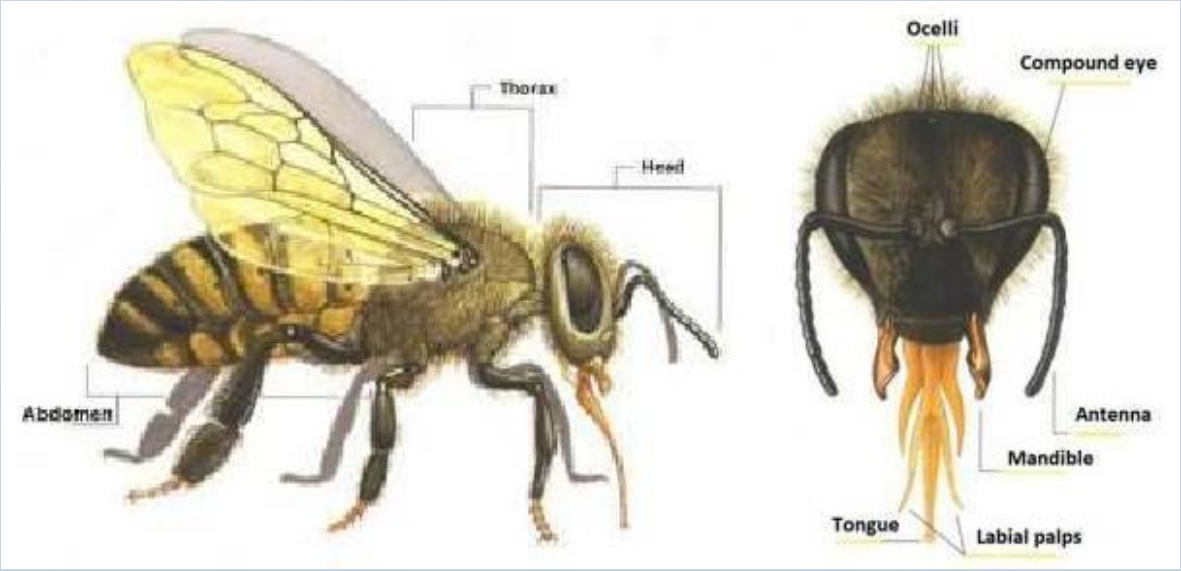
Secara fisik, *Apis mellifera* umumnya berwarna merah atau coklat dengan pita hitam dan cincin oranye-kuning pada perut, memiliki rambut pada dada dan sedikit rambut di perut, serta keranjang serbuk sari di kaki belakangnya yang berwarna coklat tua hingga hitam. Terdapat dua kasta betina, yaitu pekerja 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.

Entomologi Terapan

Apis mellifera memiliki 26 subspesies 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.

2. Morfologi A*pis Mellifera*

Tubuhnya terdiri dari tiga bagian utama: kepala, dada (toraks), dan perut (abdomen).



Struktur Tubuh Lebah dan Bagian Kepala
(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.



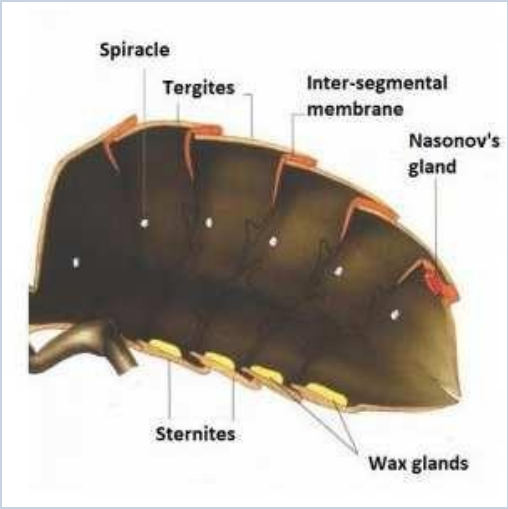
Kaki Belakang **Sayap sepasang**

(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.



Organ Internal Abdomen *Apis mellifera*

(Sumber: abejas.org/bees-external-anatomy/)

Entomologi Terapan

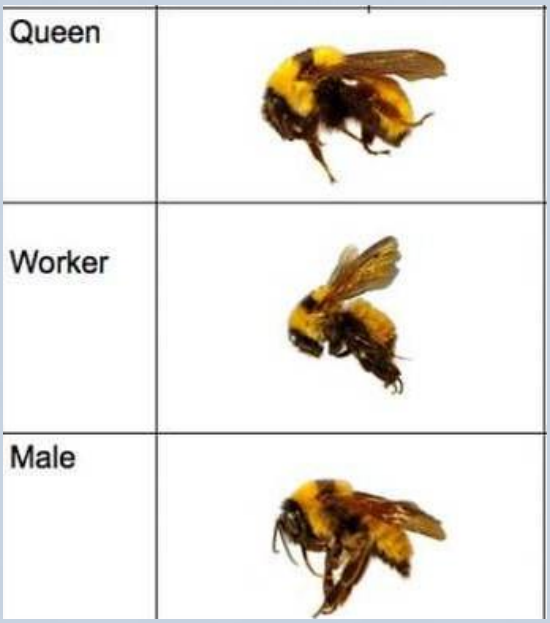
Panjang rambut ini, bersama dengan warna segmen, merupakan indikator yang digunakan untuk mengidentifikasi berbagai jenis ras lebah. Di dalam abdomen lebah, terdapat beberapa organ penting, yaitu kelenjar lilin, kelenjar Nasonov, dan sistem pertahanan yang mencakup sengat.

3. 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 (w*orker*) 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).



Eusosialitas pada Lebah

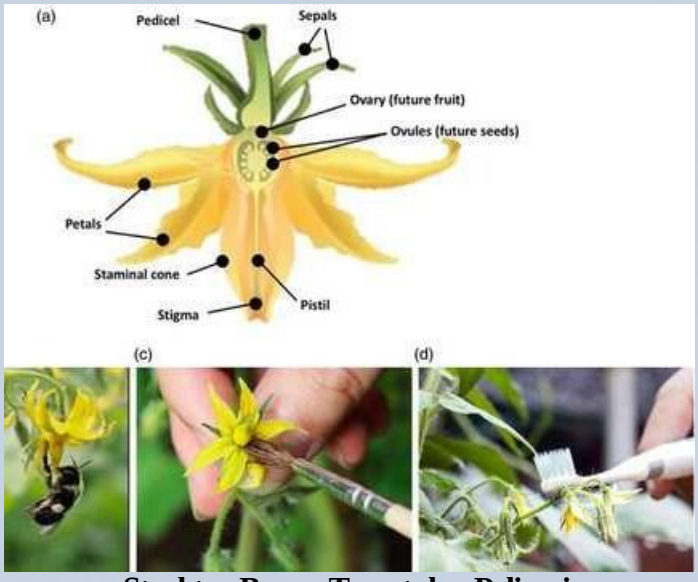
(Sumber: abejas.org/bees-external-anatomy/)

4. 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).

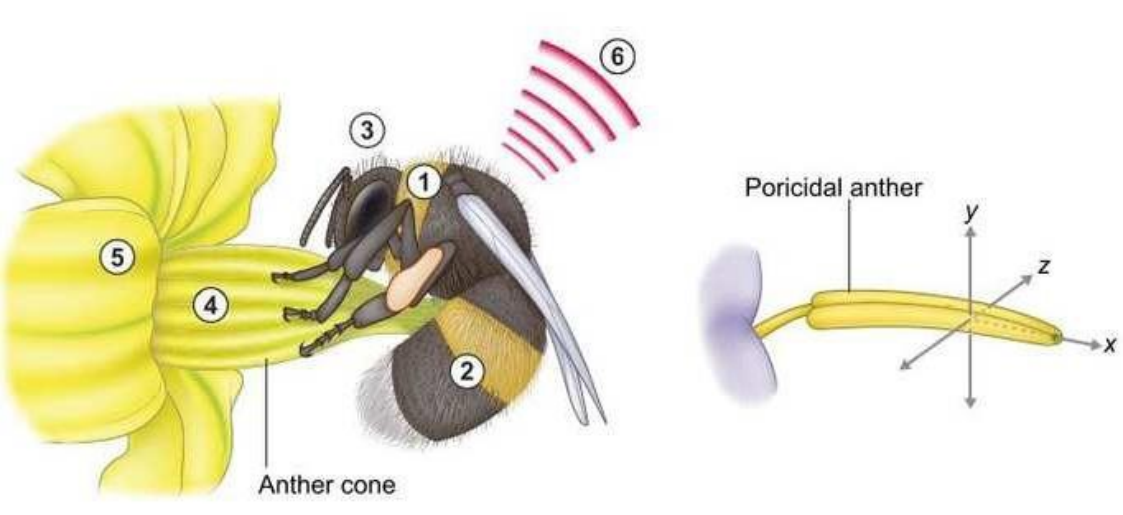
Penyerbukan biasanya tidak terjadi sampai kelopak bunga terbuka sepenuhnya (fase mekar), karena pada tahap inilah bagian-bagian reproduktif bunga — yaitu benang sari (*anther*) dan putik (*stigma*) — mulai terekspos dan aktif secara fungsional.

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.



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

Peran serangga penyerbuk, bahkan pada tanaman yang dapat menyerbuk sendiri, seringkali 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.



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 (suara; 6).

G. MATERI SINGKAT 3

1. Jenis tanaman berbunga yang bergantung pada penyerbukan

a. Bunga kakao



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)

2. Ketergantungan Tanaman Terhadap A*pis 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:

a. Bunga Matahari



(Sumber: www.kibrispdr.org)

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).

b. *Acacia mangium*



(Sumber: nparks-gov-sg.)

Tanaman *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.

Entomologi Terapan

c. Kelapa sawit

Tanaman 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.



d. Serduduk

Senduduk 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.

H. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……

Kelompok : ……..……



Polinasi dan Ketergantungan Tumbuhan terhadap Serangga *(Apis mellifera)*

Entomologi Terapan

1. Orientasi Permasalahan

Serangga sering dipandang sebagai hewan yang menjijikkan walaupun berperan penting dalam ekosistem kehidupan. Saat ini, populasi serangga terancam dan makin mengkhawatirkan bila tidak dilakukan pencegahan. Salah satunya adalah nasib lebah yang kini populasinya terus menurun. Menurut entomologis dari Departemen Proteksi Tanaman IPB Damayanti Buchori, kondisi lebah berkebalikan dengan serangga yang bersifat merugikan. "Berdasarkan data yang ada, populasi serangga yang menurun itu adalah lebah, sedangkan hama-hama invasif justru bertambah karena meluasnya daerah yang mereka kolonisasi," ujar Damayanti dikutip dari laman IPB.



Damayanti menjelaskan serangga, termasuk lebah, jangan sampai mengalami penurunan populasi. Kondisi yang bisa berakhir dengan kepunahan ini akan merugikan manusia, apalagi serangga yang menguntuhkan kehidupan. "Kerugian kehidupan ketika tidak ada serangga tentu banyak sekali, sebagai contoh, lebih dari 75 persen tumbuhan diserbuki oleh serangga penyerbuk, dengan mayoritasnya adalah lebah," kata Damayanti. Jika tidak ada penyerbuk maka tumbuhan-tumbuhan tersebut tidak dapat bereproduksi dengan baik. Hal ini akan berdampak pada hilangnya spesies tumbuhan tersebut dan juga hasil pertanian akan menurun. Damayanti juga mengatakan banyak ahli menyebut kehidupan akan runtuh jika serangga hilang dari muka bumi. Untuk mencegah kemungkinan ini, berbagai upaya dilakukan demi mengatasi penurunan populasi lebah dan serangga lain pada umumnya.
Sumber: detikEdu

Setelah membaca permasalahan diatas, jawablah soal berikut ini

2. Investigasi Konstruktif

a. Mengapa populasi lebah yang bermanfaat justru menurun, sementara populasi serangga hama meningkat? Jelaskan dengan mengaitkan faktor lingkungan dan intervensi manusia (pertanian modern, pestisida)?

b. Apa dampak paling kritis bagi manusia dan ekosistem jika populasi serangga penyerbuk terus menurun? Sebutkan dan jelaskan minimal tiga dampak langsung dan dua dampak tidak langsung

c. Mengapa sebagian masyarakat menganggap serangga menjijikkan dan berbahaya, padahal secara ilmiah mereka sangat penting? Jelaskan bagaimana persepsi sosial ini dapat memengaruhi kebijakan atau perilaku terhadap konservasi serangga?

d. Apa keterkaitan antara penurunan populasi lebah dengan potensi terjadinya krisis pangan di masa depan? Jelaskan berdasarkan proses penyerbukan, ketergantungan tanaman pangan, dan siklus produksi pertanian?

e. Bandingkan dua pendekatan ini: <Mengurangi pestisida kimia= dan <Menambah populasi lebah ternak (*Apis mellifera*)=. Menurut kalian, mana yang lebih berkelanjutan dan mengapa? Jelaskan secara ilmiah kelebihan dan risiko dari masing-masing pendekatan

3. Eksplorasi Spesimen *AR*

Dengan memanfaatkan eksplorasi spesimen digital *AR* dari lebah madu (*Apis mellifera*) dan model bunga target (misalnya, bunga tomat atau bunga kopi), analisislah secara mendalam :

a. Bagaimana adaptasi morfologi spesifik pada tubuh lebah (seperti kaki, probosis/lidah, dan rambut halus) serta struktur organ reproduksi bunga (antera dan stigma) saling berinteraksi dan mendukung efisiensi proses penyerbukan?

b. Jelaskan bagaimana setiap fitur morfologi ini berkontribusi pada keberhasilan transfer serbuk sari dan mengapa interaksi ini esensial bagi siklus reproduksi tumbuhan

I. GLOSARIUM

- Allogami : Penyerbukan silang; serbuk sari dari satu tanaman berpindah ke putik tanaman lain yang sejenis.
- Anemofili : Penyerbukan yang dibantu oleh angin.
- Apis mellifera : Spesies lebah madu yang paling dikenal dan dibudidayakan secara luas di dunia.
- Autogami : Penyerbukan sendiri; proses jatuhnya serbuk sari ke kepala putik bunga yang sama.
- Geitonogami : Penyerbukan yang terjadi antar bunga tetapi masih dalam satu tanaman yang sama.
- Hibridogami : Penyerbukan yang terjadi antara dua tanaman yang berbeda jenis tetapi masih dalam satu famili.
- Nektar : Cairan manis yang dihasilkan oleh bunga dan digunakan oleh lebah sebagai sumber energi.
- Polen / Tepung Sari : Serbuk yang mengandung sel gamet jantan pada tumbuhan berbunga. Polen dikumpulkan oleh lebah sebagai sumber protein.
- Polinasi : Proses pemindahan serbuk sari dari kepala sari (anther) ke kepala putik (stigma) untuk memungkinkan terjadinya pembuahan dan pembentukan biji.

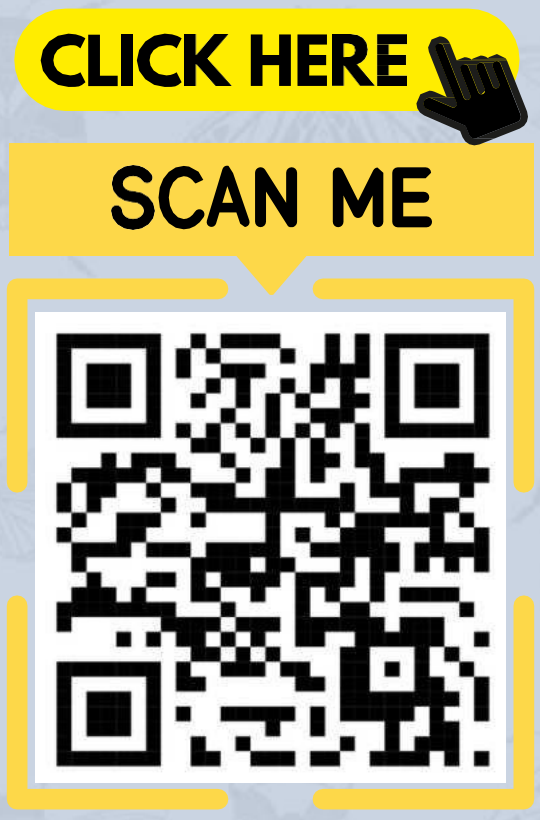
J. REFERENSI

- Alpian, a., yoga, y. K., nuwa, n., yulianti, r., joni, h., & supriyati, w. (2022). *Identifikasi jenis tanaman sebagai pakan lebah madu kelulut (trigona spp.) Di kphp katingan hulu.* Jurnal hutan tropis, 10(3), 277-283. 10.20527/jht.v10i3.14970
- Apituley, f. L., leksono, a. S., & yanuwiadi, b. (2012). *Kajian komposisi serangga polinator tanaman apel (malus sylvestris mill) di desa poncokusumo kabupaten malang.* El-hayah: jurnal biologi, 2(2). Doi: https://doi.org/10.18860/elha.v2i2.2213
- Anessa, n. T., herlina, d., & ardiarini, n. R. (2019). *Inkompatibilitas sendiri pada 4 genotipe bunga matahari (helianthus annuus l.).* Buku prosiding, 9.
- Breed, m. D., stiller, t. M., & blum, m. S. (1985). *The chemical basis of colony recognition in honey bees (apis mellifera).* Ethology, 68(4), 271–279. Https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1985.tb00155.x
- Clarke, k. E., rinderer, t. E., franck, p., quezada-euán, g., & oldroyd, b. P. (2002). *The africanization of honeybees (apis mellifera l.) Of the yucatan: a study of a massive hybridization event across time.* Evolution, 56(7), 1462–1474. Https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2002.tb01458.x
- Gómez, j. M., navarro, l., gonzález-megías, a., armas, c., perfectti, f., caravantes, á., & sánchez, r. (2025). *Pollination effectiveness affects the level of generalisation of a plant species with phenotypically plastic flowers.* Aob plants, plae065. Http s://doi.org/10.1093/aobpla/p lae065
- Halitopo, a., sonbait, l. Y., arobaya, a. Y. S., & pattiselanno, f. (2024). *Studi etnobotani pemanfaatan tumbuhan pakan lebah madu (apis mellifera) di kuluakma, wamena.* Jurnal ilmu lingkungan, 22(3), 641-647.
- Peixoto, p. G., martins, h. L., pinto, b. C., franco, a. L., amaral, l. S., & castro, c. V. D. (2022). *The significance of pollination for global food production and the guarantee of nutritional security: a literature review*. Environmental sciences proceedings, 15(1), 7. Https://doi.org/10.3390/environsciproc2022015007
- Rahmad, b., damiri, n., & mulawarman. (2021). *Jenis lebah madu dan tanaman sumber pakan pada budi daya lebah madu di hutan produksi subanjeriji, kabupaten muara enim, sumatera selatan.* Jurnal penelitian kehutanan faloak, 5(1):47-61. Doi : http ://doi.org/10.20886/jp kf.2021.5.1.47-61

- Shankar, u., & abrol, d. P. (2016). *Pollination interventions. In breeding oilseed crops for sustainable production (pp. 391-420).* Academic press. Http s://doi.org/10.1016/b978-0-12-801309-0.00017-3
- Sherman, g., & visscher, p. K. (2002). *Honeybee colonies achieve fitness through dancing.* Nature, 419(6910), 920–922. Http s://doi.org/10.1038/nature01127.
- Singh, R., Seneviratne, L., & Hussain, I. (2025). *Robust pollination for tomato farming using deep learning and visual servoing. Robotica*, *43*(1), 86–109. doi:10.1017/S0263574724001243
- Srianto, m., kaini, k., saliyem, s., warsih, e., & winarsih, w. (2020). *Keanekaragaman serangga polinator pada tanaman nanas (ananas comosus (l.) Merr.) Di desa bincau.* Biosel (biology science and education): jurnal penelitian science dan pendidikan, 9(2), 154-162. Http s://doi.org/10.33477/bs.v9i2.1631
- Winston, m. L., fell, r. D., & taylor, o. R. (1981). *The biology and management of africanized honey bees.* Annual review of entomology, 26(1), 179–192. Http s://doi.org/10.1146/annurev.en.26.010181.001143
- Zakariyya, f., rahayu, d. S., & sulistyowati, e. (2015). *Forcipomyia spp*. Sang penghulu bunga kakao, 24-28.

K. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiti kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,



L. PENUTUP

<Selamat Anda telah menyelesaikan kegiatan *e-worksheet* dalam bab 2 ini. Semoga aktivitas yang telah dilakukan dapat membantu memperdalam pemahaman, melatih kemampuan berpikir kritis, serta menumbuhkan rasa ingin tahu terhadap materi yang telah dipelajari. Teruslah belajar dengan semangat dan jadikan setiap tantangan sebagai peluang untuk berkembang. Sampai jumpa di kegiatan pembelajaran berikutnya=

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB III

"Serangga Sebagai Pengendali Hayati"

Serangga : Kepik predator (Coccinellidae)



A. PETUNJUK *E-WORKSHEET*

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "Serangga Sebagai Pengendali Hayati"**.** Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. Pretest ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet*. Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep Serangga Sebagai Pengendali Hayati**.**
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi AR yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang Anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest.* Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana Anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. PRETEST

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *pretest* singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses pretest secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.

SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Serangga Sebagai Pengendali Hayati - Kepik Predator (Coccinellidae)

Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu menjelaskan konsep dasar pengendalian hayati dan peran serangga sebagai agen pengendali hayati dalam ekosistem pertanian. 2. Peserta didik mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan berbagai jenis serangga pengendali hayati (predator, parasitoid, dan patogen) beserta mekanisme kerjanya dalam mengendalikan populasi hama.

3. Peserta didik mampu menganalisis strategi dan teknik penerapan serangga pengendali hayati secara efektif dan berkelanjutan dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT).

4. Peserta didik mampu mengevaluasi kelebihan, keterbatasan, serta tantangan penggunaan serangga pengendali hayati dalam pengelolaan hama pertanian.

5. Peserta didik mampu merancang rencana sederhana penerapan pengendalian hayati menggunakan serangga pengendali hayati pada kasus spesifik di lapangan.

Alat dan Bahan :

PC atau laptop atau Gawai

- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

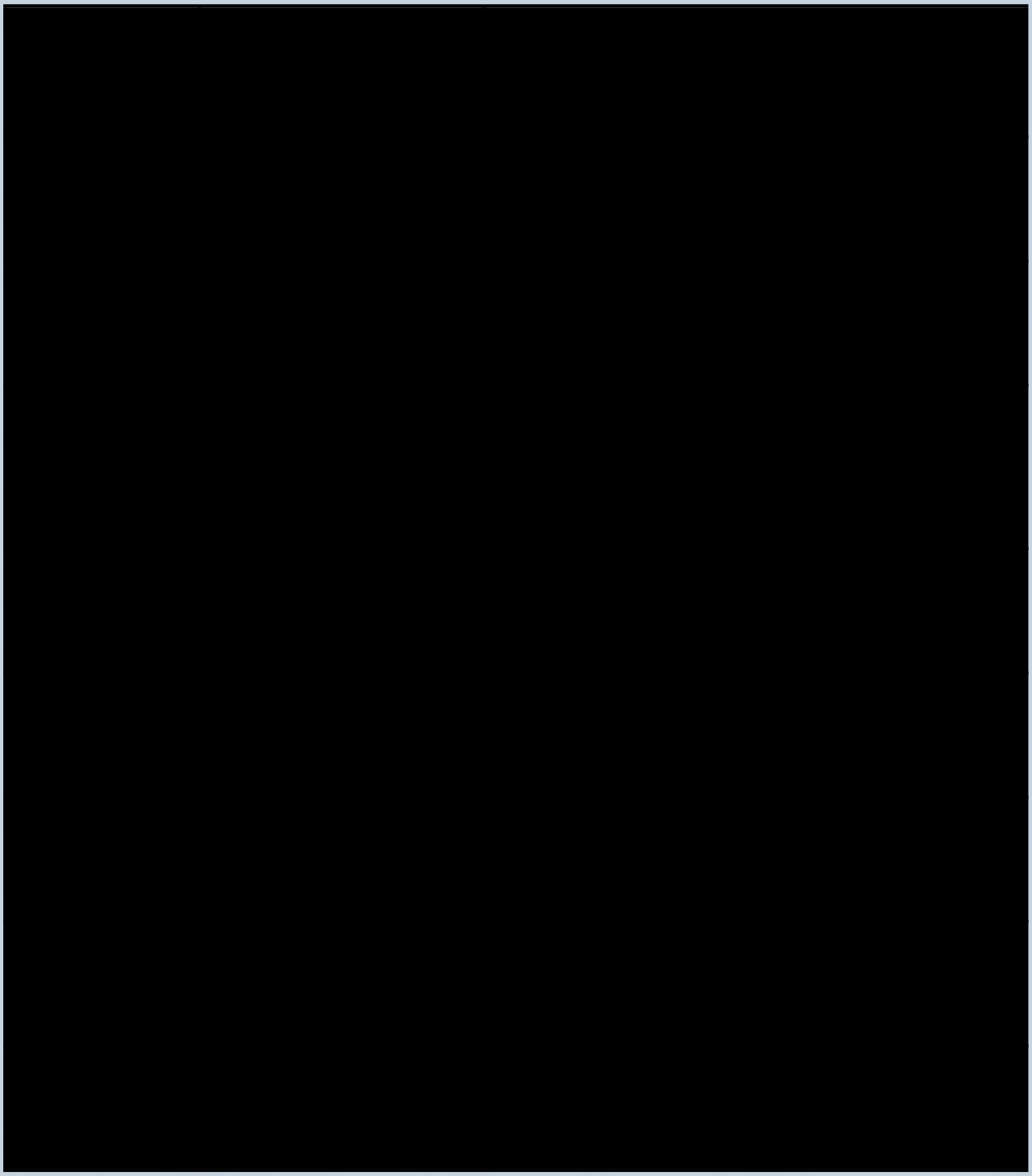
Metode Pembelajaran :

Simulasi

- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi
-

D. PENDAHULUAN

Entomologi adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari serangga, melibatkan penelitian tentang morfologi, siklus hidup, perilaku, dan ekologi serangga. Ilmu ini memiliki peran penting dalam pemahaman ekosistem dan pengelolaan serangga yang dapat berpengaruh pada pertanian, kesehatan manusia, dan lingkungan.



E. MATERI SINGKAT

1. Pengendalian Biologi atau Hayati

Pengendalian biologi atau *Biological control* adalah pengurangan populasi hama oleh musuh alami, yang biasanya melibatkan peran aktif manusia. Musuh alami ini mencakup predator, parasitoid, dan patogen. Pengendalian biologis merupakan bagian dari strategi pengendalian hama terpadu (PHT) dan dibedakan dari natural control yang terjadi tanpa campur tangan manusia (Shelton, 2015). Salah satu contoh penerapan pengendalian biologi adalah penggunaan kumbang kepik untuk mengendalikan populasi kutu daun yang menyerang tanaman. Adapun komponen utama dari Pengendalian Hayati yaitu sebagai berikut :

a. Predator

Serangga atau hewan yang memangsa hama secara langsung.

Contoh: *Ladybug* (kumbang koksi) memakan kutu daun (aphids), laba-laba memangsa berbagai serangga kecil.

b. Parasitoid

Serangga yang meletakkan telurnya pada atau di dalam tubuh inang (hama), lalu larvanya berkembang dengan memakan inang tersebut hingga mati.

Contoh: Trichogramma (parasitoid telur penggerek batang), Braconidae (parasitoid ulat).

c. Patogen (Mikroba Pengendali Hama)

Bakteri, virus, jamur, yang menginfeksi dan membunuh hama.

Contoh: *Bacillus thuringiensis* (Bt) membunuh ulat, Beauveria bassiana (jamur entomopatogen) menginfeksi serangga.

d. Kompetitor atau Antagonis

Organisme yang bersaing dengan hama sehingga populasinya tertekan.

Keunggulan Pengendalian Hayati:

• Ramah lingkungan (tidak mencemari tanah/air).

• Tidak menimbulkan resistensi hama seperti pestisida kimia.

• Berkelanjutan karena membentuk keseimbangan ekosistem.

Contoh Aplikasi:

• Melepas Trichogramma untuk mengendalikan hama penggerek batang padi.

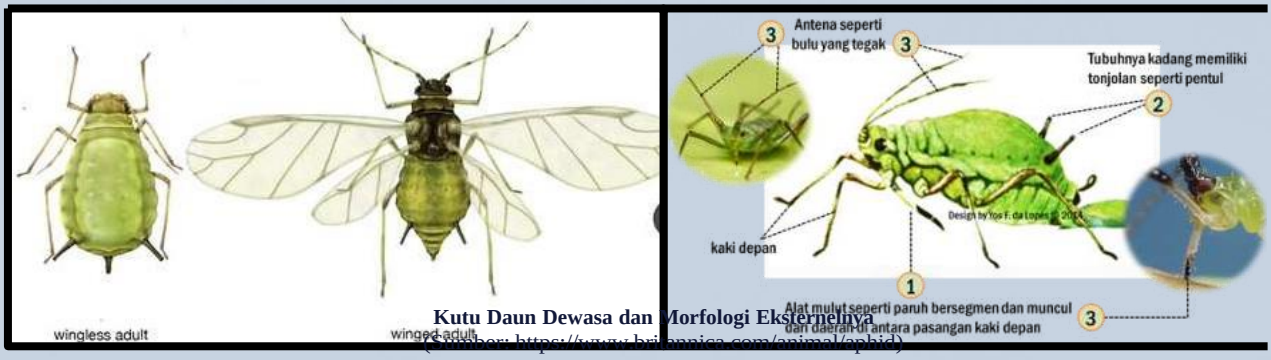
• Menggunakan *Metarhizium anisopliae* (jamur) untuk mengendalikan wereng coklat.

Dengan pendekatan ini, pengendalian hama menjadi lebih alami dan berkelanjutan. Namun, efektivitasnya tergantung pada pemilihan agen hayati yang tepat dan kondisi lingkungan.

2. Karakteristik Kutu Daun (Aphidoidea)

Berukuran kecil berukuran 1-6 mm, berbentuk buah pir dengan tubuh lunak dan hidup berkoloni. Mereka dapat berwarna hijau, hitam, merah, kuning, cokelat, atau abu-abu. Kutu daun memiliki tiga bagian tubuh (kepala, toraks, abdomen) dengan tiga ruas toraks (*protoraks*, *mesotoraks*, *metatoraks*) yang masing-masing memiliki sepasang kaki. Kutu daun dewasa bisa bersayap atau tidak bersayap, dengan kutu daun bersayap sedikit lebih gelap. Kutu daun dewasa bisa berbentuk tidak bersayap (*wingless adult*) atau bersayap (*winged adult*), di mana kutu daun bersayap cenderung memiliki warna sedikit lebih gelap.

Serangan kutu daun (*aphid*) pada tanaman menyebabkan kerusakan berupa pengisapan cairan tanaman yang menghambat pertumbuhan, menyebabkan daun keriting, kerdil, dan layu, serta meninggalkan embun madu yang memicu pertumbuhan jamur jelaga; kutu daun dapat muncul sepanjang tahun, namun populasinya seringkali memuncak pada musim semi dan awal musim panas saat kondisi hangat dan lembap mendukung perkembangbiakannya.



Kutu Daun Dewasa dan Morfologi Eksternalnya
(Sumber: https://www.britannica.com/animal/aphid)

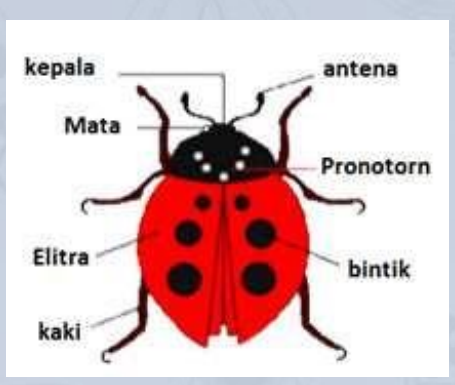
Meskipun dapat muncul sepanjang tahun di iklim tropis Indonesia, populasinya seringkali memuncak pada musim transisi atau awal musim hujan dan awal musim kemarau, ketika kondisi hangat dan lembap sangat mendukung perkembangbiakan mereka. Lebih dari itu, kutu daun juga berperan sebagai vektor penting bagi berbagai penyakit virus tanaman, yang dapat menyebabkan kerugian hasil panen yang signifikan.

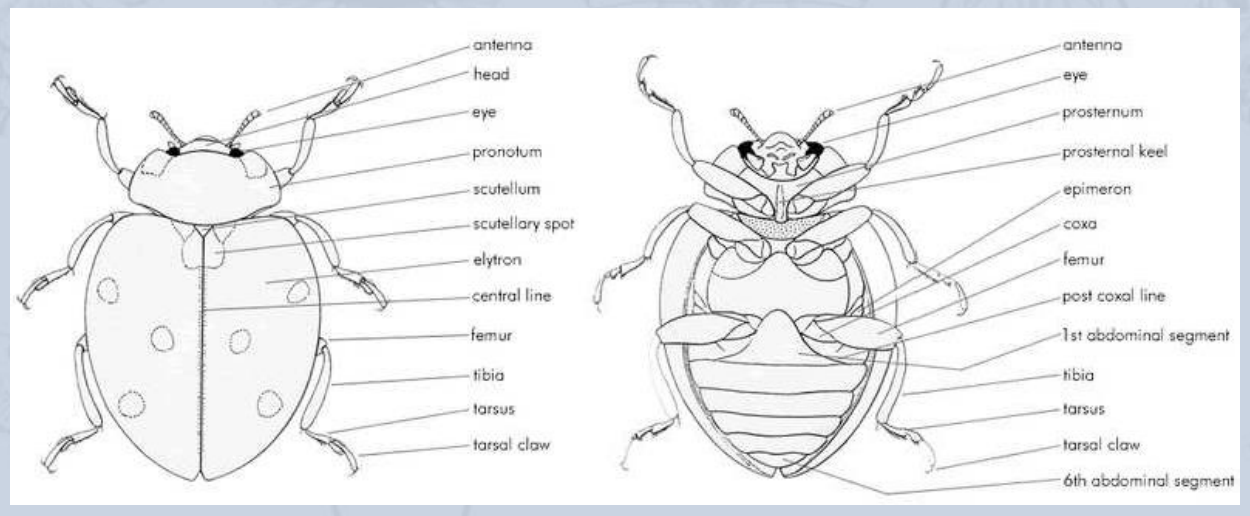
Untuk pengendalian, petani di Indonesia sering mengombinasikan metode

secara fisik (penyemprotan air bertekanan tinggi), penggunaan pestisida nabati (misalnya ekstrak bawang putih atau mimba), hingga penggunaan predator alami seperti kumbang koksi, serta aplikasi insektisida kimia secara bijaksana jika populasi sudah di ambang ekonomi.

3. Karakteristik Kepik (Coccinellidae)

Tubuh bulat dengan punggung berwarna-warni, seringkali dengan bintik-bintik. Mereka memiliki sayap elitra yang keras, melindungi sayap belakang yang transparan. Kaki-kaki mereka pendek, dan kepala terlihat membungkuk ke bawah untuk membantu saat makan.





Morfologi Kepik (Sisi Dorsal dan Ventral)

(Sumber: https://coleoptera.org.uk/coccinellidae/anatomy)

Bagian-bagian eksternal utama kumbang koksi terdiri dari mata, pronotum, elitra (sayap depan yang keras), bintik-bintik, dan kaki. Morfologi dorsal menampilkan bagian-bagian seperti antena, kepala, mata, pronotum, skutelum, elitra, dan bagian-bagian kaki (*femur*, *tibia*, *tarsus*, *tarsal claw*). Sementara itu, morfologi ventral menunjukkan bagian-bagian seperti antena, mata, *prosternum*, *epimeron*, *coxa*, *femur*, *post coxal line*, segmen-segmen abdomen, *tibia*, *tarsus*, dan *tarsal* claw. Secara keseluruhan, gambar-gambar ini memberikan gambaran komprehensif tentang struktur tubuh eksternal kumbang koksi.

4. Siklus Hidup Kepik

Kepik *Harmonia axyridis*, yang merupakan spesies kepik yang umum dan dikenal sebagai predator kutu daun. Siklus hidupnya meliputi empat tahap metamorfosis sempurna (Holometabola) yaitu :

a. Telur : Siklus dimulai dari telur berbentuk oval, biasanya berwarna kuning atau oranye, yang diletakkan secara berkelompok di dekat sumber makanan, seperti koloni kutu daun.

b. Larva: Setelah menetas dari telur, larva kepik akan melalui beberapa tahapan pertumbuhan yang disebut instar. Pada gambar, terlihat *Instar 1, Instar 2, Instar 3, dan Instar 4*. Larva kepik memiliki tubuh memanjang, seringkali berwarna gelap dengan bercak oranye atau kuning, dan memiliki kaki yang jelas. Pada setiap instar, larva akan tumbuh dan berganti kulit (*molting*). Tahap larva adalah tahap predator paling aktif, di mana mereka mengonsumsi kutu daun dalam jumlah besar.

c. Pupa: Setelah mencapai instar terakhir (I*nstar 4*), larva akan berubah menjadi pupa. Tahap pupa adalah tahap tidak aktif di mana kepik mengalami transformasi internal yang signifikan. Pupa biasanya menempel pada permukaan daun atau batang, dan pada gambar terlihat perubahan warna pupa seiring perkembangannya.

d. Dewasa: Dari pupa, muncullah kepik dewasa (imago). Kepik dewasa *Harmonia axyridis* memiliki ciri khas tubuh bundar atau oval, sayap keras (elytra) yang umumnya berwarna oranye hingga merah dengan bintik-bintik hitam bervariasi. Kepik dewasa juga memangsa kutu daun dan siap untuk bereproduksi, memulai siklus hidup baru.

Dengan demikian, siklus hidup *Harmonia axyridis* menunjukkan efisiensinya sebagai agen pengendali hama biologis alami yang sangat efektif dalam menekan populasi kutu daun melalui tahapan perkembangan yang masing-masing berkontribusi pada predasi hama.

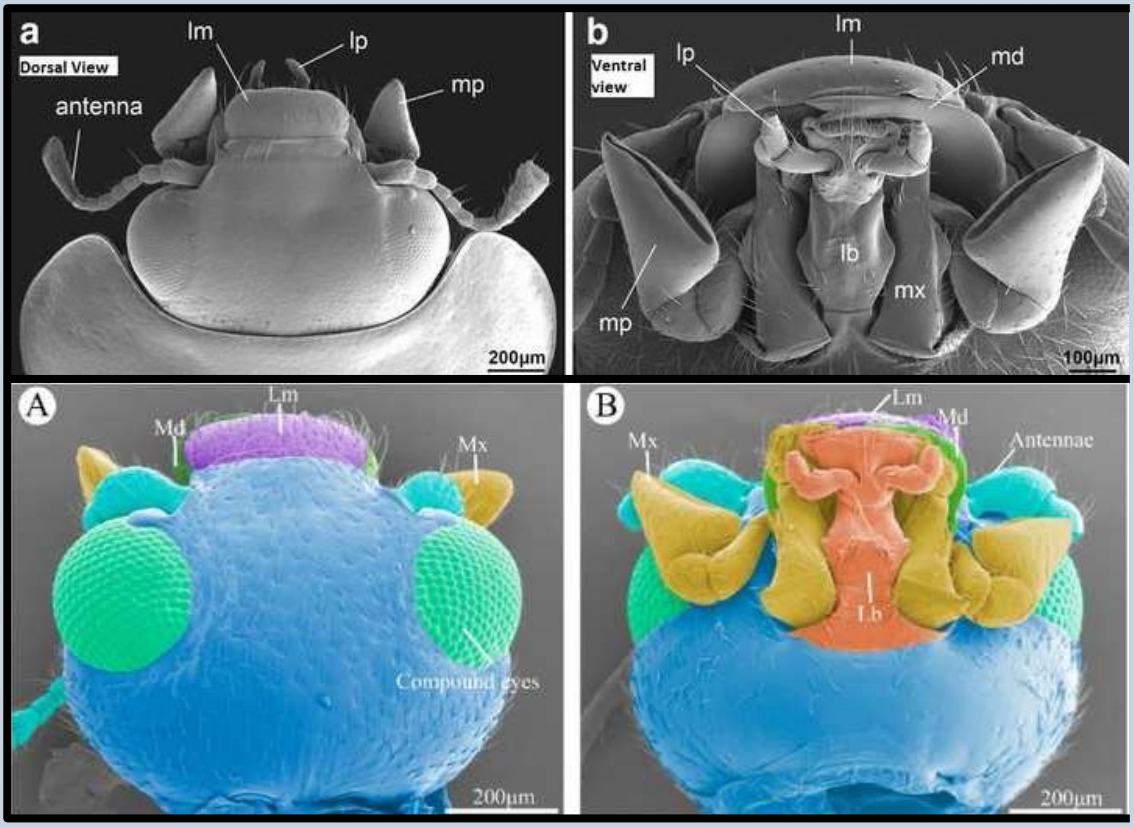


Siklus Hidup Kepik
(Sumber: Shandilya, 2024)

5. Hubungan Morfologi Mulut Dengan Predasi Kutu Daun

Struktur morfologi mulut Coccinelidae (ordo Coleoptera) yang terdapat di segmen kepala (Caput), memperlihatkan adaptasi spesifik untuk dietnya yang bervariasi, meskipun sebagian besar spesies dikenal sebagai predator. Secara umum, struktur mulutnya adalah tipe pengunyah dan penjilat (*chewing-lapping type*), yang merupakan karakteristik umum dalam subordo Polyphaga.

a. Struktur Morfologi Mulut Kepik (*Ladybeetle*)

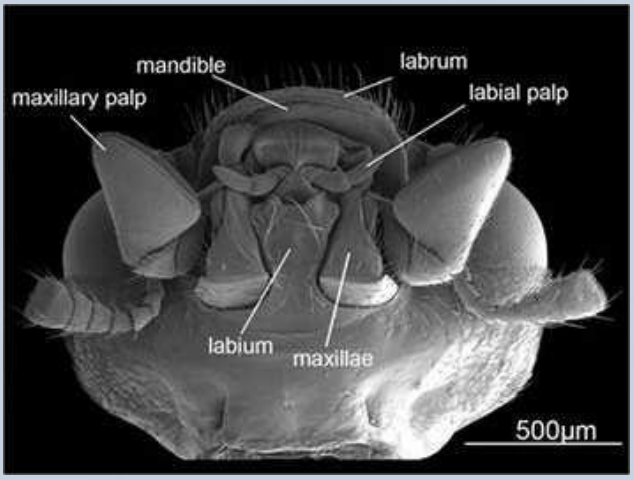


Struktur Morfologi Mulut Kepik (*Ladybeetle*)
(Sumber: Hao *et al*., 2020; Chen *et al* ., 2024)

Berdasarkan gambar diatas yang menampilkan dua pandangan berbeda dari struktur mulut Coccinellidae (kumbang koksi) menggunakan mikroskop elektron pemindaian, dapat dijelaskan bahwa struktur mulutnya terdiri dari beberapa bagian utama yang terartikulasi secara kompleks:

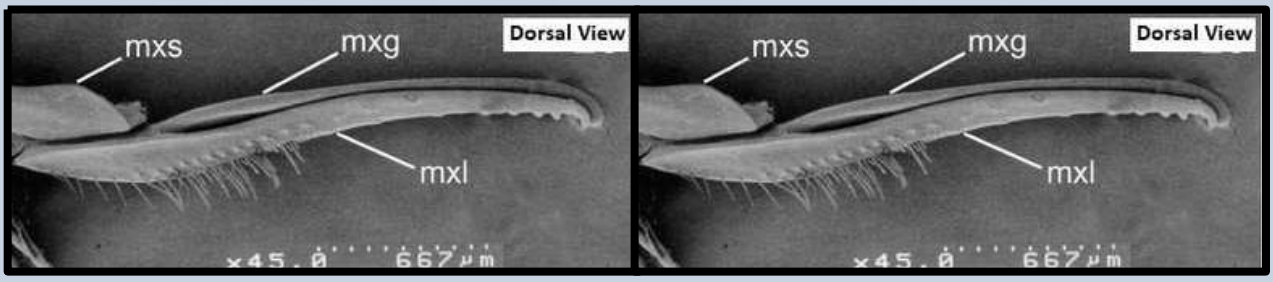
1) Labrum (Bibir Atas/lm): Terlihat jelas pada pandangan anterior (a) dan ventral (b), labrum berada di bagian anterior (depan) dan berfungsi sebagai penutup atau pelindung. Bentuknya pipih dan sering kali berbulu, membantu dalam manipulasi makanan.

2) Mandibula (Rahang Bawah/md): Meskipun tidak diberi label pada pandangan anterior (a), mandibula merupakan sepasang struktur lateral yang kuat dan berkitin, terlihat pada pandangan ventral (b). Mandibula Coccinelidae memiliki dua gigi atau dua ujung di bagian puncaknya (apeks) yang disebut mandibula bidentata. Mandibula bidentata adalah ciri khas yang sering ditemukan pada serangga, termasuk Coccinellidae (kepik) yang sangat efektif untuk memotong dan mengunyah mangsa, seperti kutu daun.



Labrum, Mandibulla & Maxilla Kepik
(Sumber: Hao *et al.*, 2020)

3) Maksila (Rahang Atas/mx): Terletak di posterior (belakang) mandibula, maksila adalah struktur yang lebih kompleks. Meskipun tidak diberi label pada pandangan anterior (a), maksila terlihat jelas pada pandangan ventral (b). Maksila terdiri dari beberapa segmen, termasuk *stipes* (mxs), *galea*, dan *lacinia. Galea* (mxg) dan lacinia (mxl) berbentuk seperti lobus dan sering kali ditutupi oleh bulu atau sikat, yang membantu dalam merasakan dan menelan makanan. Maksila juga dilengkapi dengan palpus maksilaris (mp), sepasang organ sensori bersegmen yang terlihat pada pandangan anterior (a) dan ventral (b), yang berfungsi untuk merasakan tekstur dan komposisi makanan.



Struktur Segmen Maxilla Sisi Kanan Coleoptera
(Stipes, Galea, dan Lacinia)
(Sumber: Liebheer, 2016)

4) Labium (Bibir Bawah/lb): Terletak di bagian ventral (bawah) dan posterior dari maksila, labium terlihat pada pandangan ventral (b). Labium berfungsi sebagai dasar atau bibir bawah yang membantu dalam penanganan makanan. Bagian utamanya adalah mentum dan prementum. Labium juga memiliki palpus labialis (lp), yang terlihat pada pandangan anterior (a) dan ventral (b), yang juga merupakan organ sensori untuk merasakan makanan.
5) Antena: Selain struktur mulut, pandangan anterior (a) juga menampilkan antena, organ sensori penting lainnya pada kepala Coccinellidae.

b. Adaptasi Fungsional dan Spesialisasi Ekologis

Adaptasi morfologi mulut Coccinelidae dapat diinterpretasikan sebagai hasil seleksi alam yang mengarahkan pada spesialisasi ekologis, di mana struktur fisik secara optimal disesuaikan dengan sumber makanan. Dalam konteks predasi, khususnya terhadap kutu daun (Aphidoidea), mandibula telah berevolusi menjadi struktur yang kukuh dan memiliki ujung tajam (*apical teeth*). Karakteristik ini secara fungsional memfasilitasi proses mekanis yang efisien untuk menghancurkan eksoskeleton kutu daun, sebuah prasyarat krusial untuk asimilasi nutrisi.

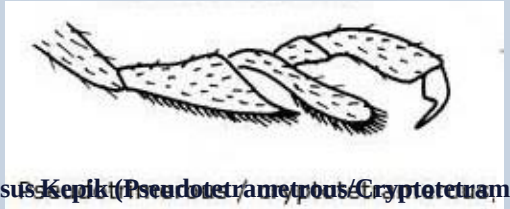
Keberadaan palpus pada maksila dan labium menyoroti peran penting organ sensori dalam rantai perilaku makan. Organ ini berfungsi sebagai kemoreseptor dan taktil, memungkinkan serangga untuk mendeteksi isyarat kimiawi dan fisik yang mengindikasikan keberadaan dan kondisi mangsa. Interaksi ini mendasari keputusan serangga untuk memulai proses predasi. Struktur galea dan lacinia, yang berbentuk lobus dan dilapisi bulu, merefleksikan adaptasi fungsional ganda. Morfologi ini tidak hanya mendukung pengunyahan, tetapi juga memungkinkan penyerapan cairan tubuh mangsa. Dengan demikian, struktur tersebut mengoptimalkan ekstraksi nutrisi, sebuah strategi yang meningkatkan efisiensi konsumsi mangsa.

Secara teoritis, morfologi mulut Coccinelidae merupakan manifestasi dari spesialisasi evolusioner yang memungkinkan peran efektifnya sebagai agen pengendali hama biologis. Integrasi antara mandibula yang berperan dalam penghancuran, organ sensori yang peka, serta struktur yang memfasilitasi penyerapan cairan, secara sinergis membentuk mekanisme makan yang sangat efisien. Adaptasi ini secara fundamental mendukung keberhasilan Coccinelidae dalam mengeksploitasi relung ekologisnya.

6. Hubungan Struktur Kaki Dan Mobilitas Kepik Terhadap Predasi Kutu Daun

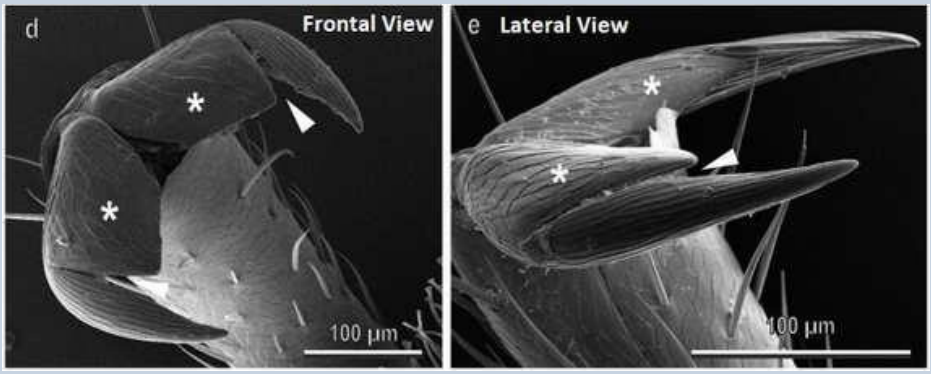
Kaki kepik (Coccinellidae) dan mobilitasnya merupakan elemen krusial yang secara langsung berkorelasi dengan perilaku predasinya yang efisien terhadap kutu daun. Adaptasi pada struktur kaki dan kemampuan pergerakannya memungkinkan kepik untuk menjadi pemburu yang efektif di habitat yang seringkali kompleks, seperti permukaan daun dan batang tanaman. Struktur kaki kepik dirancang untuk performa predasi. Kaki mereka umumnya relatif pendek namun kokoh, dilengkapi dengan cakar kecil dan bantalan perekat yang dikenal sebagai pulvilli pada segmen tarsus (ujung kaki). Fitur ini memberikan cengkeraman (grip) yang luar biasa pada berbagai tekstur permukaan tanaman, mulai dari yang halus hingga berbulu. Cengkeraman kuat ini esensial saat kepik:
1) Berburu di Permukaan Vertikal atau Miring: Memastikan stabilitas saat mengejar mangsa atau menjelajahi area makan yang tidak rata.
2) Menahan Mangsa: Setelah berhasil menangkap kutu daun, cengkeraman kaki membantu kepik untuk menahan mangsa yang licin dan seringkali berukuran serupa, mencegahnya melarikan diri saat proses konsumsi.

Kaki kepik terdiri dari beberapa segmen utama. Namun, ada kekhasan pada segmen tarsus (kaki bagian bawah) yang sangat mencirikan kepik, Adapun segmen-segmennya yaitu :
1) Koksa (Coxa): Segmen paling basal (pangkal) yang melekat pada toraks (dada) serangga. Ini memungkinkan pergerakan kaki secara keseluruhan.
2) Trokanter (Trochanter): Segmen kecil yang menghubungkan koksa dengan femur.
3) Femur (Paha): Segmen kaki yang paling besar dan kuat, berfungsi sebagai "paha" serangga. Di sinilah sebagian besar otot-otot kaki berada.
4) Tibia (Betis): Segmen yang bentuknya lebih ramping dibandingkan femur, berperan menghubungkan femur dengan tarsus.
5) Tarsus (Kaki bawah/Telapak kaki): Ini adalah bagian yang paling menarik dan khas pada kaki kepik. Tarsus adalah "kaki" sejati serangga dan terdiri dari beberapa segmen kecil (tarsomer) yaitu :



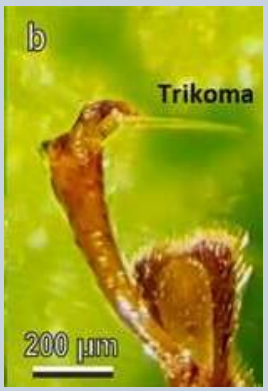
Tarsus Kepik (Pseudotetramerous/Cryptotetramerous)
(Sumber: angelfire.com/bug2/j_poorani/morphology.htm)

a) Pseudotetramerous (atau Cryptotetramerous): Inilah ciri khas tarsus kepik. Meskipun secara visual terlihat hanya memiliki tiga segmen (trimeral), sebenarnya tarsus kepik memiliki empat segmen (tetramerous). Segmen ketiga sangat kecil dan tersembunyi, seringkali terjepit atau menyusut di antara lobus dari segmen kedua. Oleh karena itu, disebut "pseudo" (semu) tiga segmen atau "kripto" (tersembunyi) empat segmen.
b) Segmen Kedua yang Berlobus: Segmen tarsus kedua pada kepik seringkali melebar dan berlobus (memiliki tonjolan seperti daun). Ini memberikan permukaan yang lebih luas dan mendukung segmen ketiga yang tersembunyi serta cakar.
c) Cakar Tarsus (*Tarsal Claws*) terdapat sepasang di di ujung tarsus. Cakar ini sangat penting untuk mobilitas dan perilaku predasi kepik. Ciri khas cakar kepik adalah adanya gigi kecil (*Asterisk/Basal Tooth)* atau tonjolan di bagian dasar setiap cakar. Gigi ini memberikan cengkeraman ekstra, memungkinkan kepik untukm mncengkeram permukaan yang licin atau berbulu pada tanaman, untuk berpegangan kuat saat kondisi berangin, serta untuk menahan mangsa yang bergerak seperti kutu daun agar tidak lolos.



Asterisk atau Basal Tooth pada Cakar Kepik
(Sumber: Salerno *et al*, 2023)

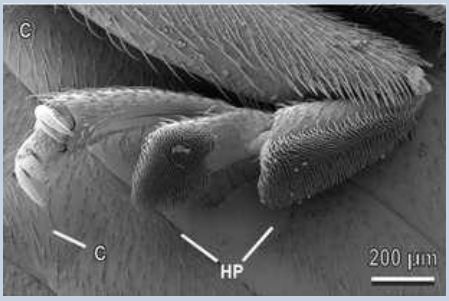
Cakar kepik membentuk cengkraman atau Keterkaitan (*Interlocking*) dengan Trikoma : Gambar menunjukkan bahwa cakar dengan gigi basal ini secara spesifik berinteraksi dengan rambut-rambut halus (trikoma) pada permukaan tanaman. Gigi dan bentuk cakar memungkinkan terbentuknya mekanisme "penguncian" atau keterkaitan mekanis dengan trikoma, yang sangat meningkatkan stabilitas dan daya cengkeram kepik pada permukaan tanaman yang bertekstur.



Cengkraman Cakar pada Trikoma Tumbuhan
(Sumber: Salerno *et al*, 2023)

Entomologi Terapan

6) Pulvilli (Bantalan Perekat): Di bawah cakar, seringkali terdapat bantalan kecil yang disebut pulvilli. Bantalan ini mungkin memiliki rambut-rambut halus atau struktur mikroskopis lainnya yang membantu kepik untuk berpegangan pada permukaan yang sangat halus atau licin melalui gaya van der Waals atau adhesi kapiler, melengkapi fungsi cakar untuk berbagai jenis permukaan.



Pulvilli atau *Hairy Pads* [HP]) pada Cakar (Tarsus) Kepik
(Sumber: Salerno *et al*, 2023)

Tingginya mobilitas kepik juga merupakan faktor penentu keberhasilan predasi. Kepik mampu bergerak dengan cepat dan lincah di antara koloni kutu daun yang padat. Mobilitas ini mencakup:

a) Pencarian Mangsa (*Foraging*), kemampuan untuk menjelajahi area yang luas di tanaman, secara sistematis memeriksa daun demi daun untuk menemukan populasi kutu daun yang tersembunyi atau baru muncul (Pan *et al.,* 2020). Kepik dewasa seringkali merupakan predator yang sangat aktif, terus bergerak mencari mangsa.

b) Pengejaran dan Penangkapan, mobilitas tinggi kepik memungkinkan mereka untuk mendekat dan menangkap mangsa dengan cepat sebelum kutu daun sempat melakukan respons pertahanan atau melarikan diri.

c) Penghindaran Predator Lain atau Bahaya, untuk merespons ancaman lingkungan atau menghindari predator mereka sendiri, memastikan kelangsungan hidup untuk terus memangsa.

Dengan demikian, sinergi antara kaki yang adaptif untuk mencengkeram dan mobilitas yang tinggi memungkinkan kepik untuk menjelajah, menemukan, mengejar, menangkap, dan menahan kutu daun dengan efisiensi tinggi. Kaki dan mobilitas bukan hanya mendukung pergerakan, tetapi secara fundamental menjadi alat utama bagi kepik dalam melaksanakan strategi predasinya, menjadikan mereka agen pengendali hama biologis yang sangat efektif.

7. Interaksi Kutu Daun dan Kepik

Interaksi antara kutu daun (*aphid*) dan kepik adalah contoh klasik dari hubungan predator-mangsa dalam ekosistem. Kutu daun merupakan hama pertanian yang sangat umum, dikenal karena kemampuannya untuk mengisap getah tanaman, menyebabkan kerusakan, dan menyebarkan penyakit. Di sisi lain, kepik, terutama larva dan kepik dewasa dari beberapa spesies, adalah predator alami kutu daun yang rakus. Kepik dewasa betina biasanya akan bertelur di dekat koloni kutu daun, memastikan bahwa larva yang menetas memiliki sumber makanan yang melimpah segera setelah menetas. Interaksi ini sangat penting dalam pengendalian hayati hama, di mana kehadiran kepik dapat secara signifikan mengurangi populasi kutu daun dan dampaknya pada tanaman.

Kepik memiliki adaptasi khusus yang membuatnya menjadi predator yang efektif terhadap kutu daun. Misalnya, larva kepik memiliki nafsu makan yang sangat besar dan dapat mengonsumsi puluhan hingga ratusan kutu daun per hari. Mereka bergerak perlahan di antara daun, mencari dan memangsa kutu daun yang relatif tidak bergerak. Kepik dewasa juga berperan aktif dalam memangsa kutu daun, meskipun beberapa spesies kepik dewasa mungkin juga mengonsumsi serbuk sari atau nektar. Kemampuan kepik untuk dengan cepat menemukan dan mengonsumsi kutu daun menjadikannya agen yang berharga dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi kebutuhan akan intervensi kimiawi dalam pertanian.



Kepik Memakan Kutu Daun Tanpa Sayap
(Sumber: https://www.amleo.com/ladybug-beetles)

***Scan* untuk akses Video Kepik Memakan Kutu Daun**

CLICK HERE

Meskipun kepik adalah predator yang tangguh, interaksi ini tidak selalu satu arah. Kutu daun telah mengembangkan berbagai strategi pertahanan untuk menghindari predasi, termasuk sekresi feromon, mengeluarkan embun madu yang menarik semut sebagai pelindung, atau membentuk koloni yang sangat padat sehingga menyulitkan kepik untuk memangsa secara efektif. Selain itu, penggunaan pestisida yang berlebihan dapat berdampak negatif pada populasi kepik, sehingga mengganggu keseimbangan alami dan berpotensi memperburuk masalah kutu daun. Oleh karena itu, memahami dinamika interaksi antara kutu daun dan kepik sangat penting untuk mengembangkan strategi pengelolaan hama yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

F. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……

Kelompok : ……..……

Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan uraikan juga kedalam format *doc/pdf*.

1. Pengalaman Konkrit



a. Berdasarkan video, bagaimana kepik berperan sebagai predator alami dalam ekosistem pertanian? Jelaskan mekanisme predasinya

b. Mengapa pengendalian hayati menggunakan kepik dapat dianggap lebih berkelanjutan dibandingkan pestisida kimia? Berikan alasan berdasarkan dampak lingkungan

c. Jika populasi kepik di suatu lahan pertanian menurun drastis, apa dampaknya terhadap populasi kutu daun dan kesehatan tanaman? Buat prediksi berdasarkan interaksi ekosistem

Entomologi Terapan

Eksplorasi Spesimen *AR*

Morphology AR Coccinellidae & Aphidoidea

SCAN ME



Interaksi Coccinellidae & Aphidoidea

SCAN ME



2. Investigasi Konstruktif

a. Identifikasi Masalah: Baca berita aktual berikut tentang masalah hama di pertanian:



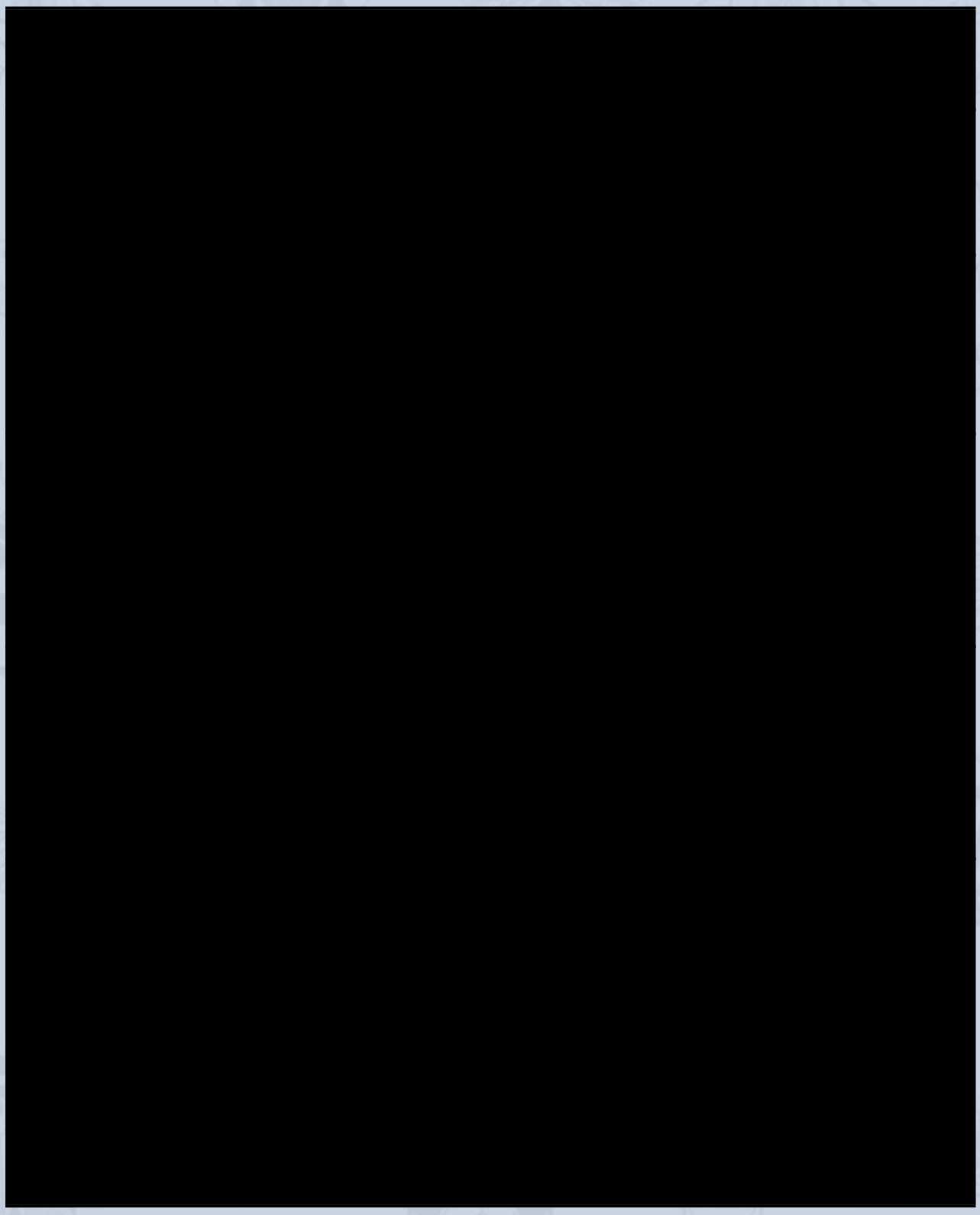

<Di wilayah Lampung, Indonesia, petani cabai menghadapi serangan masif kutu daun (Aphididae) pada musim tanam 2025. Serangan ini diperkirakan menyebabkan kerugian hingga 30% dari hasil panen cabai seluas 1.500 hektar. Kutu daun tidak hanya merusak tanaman dengan menghisap cairan daun, tetapi juga menyebarkan virus tanaman yang memperparah kerusakan. Penggunaan pestisida kimia telah menyebabkan resistensi pada populasi kutu daun, sehingga petani mencari solusi pengendalian hayati. Namun, tantangan seperti kurangnya populasi predator alami (seperti kepik) dan biaya implementasi pengendalian hayati menjadi hambatan utama.=

b. Diskusikan dalam kelompok untuk merancang strategi pengendalian hayati untuk masalah di atas. Pertimbangkan:
1) Berapa banyak kepik yang dibutuhkan untuk mengendalikan 10.000 kutu daun per minggu pada lahan 1 hektar?
2) Bagaimana cara meningkatkan populasi kepik di lahan pertanian?
3) Apa tantangan yang mungkin muncul dan solusinya?

c. Telusuri jurnal ilmiah (misalnya, melalui Google Scholar atau jurnal pertanian lokal seperti Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan) untuk menemukan rekomendasi tentang penggunaan kepik sebagai pengendalian hayati. Contoh rekomendasi: <Satu kepik dapat memakan 20-130 kutu daun per hari= (sumber: J.Bio.Innov7 (2), pp: 185-192, 2018 |ISSN 2277-8330 (Electronic).

3. Konseptualisasi Abstrak

Susun hasil investigasimu ke dalam tabel berikut



4. Eksperimen Aktif

Tujuan Kegiatan :
Membuat video kampanye untuk mempromosikan pengendalian hayati menggunakan kepik dan mengunggahnya di media sosial.

Langkah Kerja:
a. Buat vidio kampanye berdurasi 1-2 menit yang berisi:
1) Pendahuluan: Jelaskan pentingnya pengendalian hayati.
2) Isi: Tunjukkan Peran kepik dalam mengendalikan kutu daun berdasarkan hasil investigasi.
3) Penutup: Ajak masyarakat untuk mendukung pertanian berkelanjutan dengan pengendalian hayati.
b. Gunakan elemen kreatif seperti animasi sederhana, narasi, atau rekaman langsung. Pastikan struktur vidio jelas dan menarik.
c. Unggah vidio di platform media sosial (misalnya, Instagram, Tiktok, atau YouTube) dengan *hastag* #PengendalianHayati dan tag akun sekolah/pendidik.
d. Sertakan deskripsi singkat diunggahan : < Video ini dibuat untuk mempromosikan pengendalian hayati menggunakan kepik sebagai solusi alami pengendalian hama. Dukung pertanian berkelanjutan Jangan Lupa Gunakan Tagar #Pengendalian Hayati #EntomologiBerkelanjutan=.
e. **Output:** kirimkan link unggahan vidio kepada pendidik.

Tulis refleksi singkat yang menjawab :
Apa yang anda pelajari dari proyek ini tentang pengendalian hayati?

Apa tantangan terbesar yang anda hadapi dan bagaimana anda mengatasinya?

Bagaimana proyek ini mengubah pandanganmu tentang pertanian berkelanjutan?

G. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,





H. GLOSARIUM

- Antenna (Antena): Sepasang organ sensorik yang terdapat di kepala serangga, digunakan untuk sentuhan, penciuman, dan perasa.
- Dorsal: Merujuk pada sisi punggung atau atas suatu organisme.
- Elytra (Elitra): Sepasang sayap depan yang mengeras pada kumbang, berfungsi sebagai pelindung sayap belakang yang tipis dan membranosa.
- Embun Madu (*Honeydew*): Cairan manis lengket yang dikeluarkan oleh kutu daun sebagai produk sampingan dari proses pengisapan getah tanaman.
- Femur: Bagian paha pada kaki serangga.
- Instar: Tahap perkembangan antara dua molting (pergantian kulit) pada larva serangga.
- Jamur Jelaga (*Sooty Mold*): Jamur berwarna hitam yang tumbuh pada embun madu yang dikeluarkan kutu daun, menghambat fotosintesis tanaman.
- Larva: Tahap imatur serangga yang menjalani metamorfosis sempurna (Holometabola), biasanya sangat aktif makan.
- Mandibula: Rahang bawah atau alat pengunyah pada serangga.
- Molting (Ganti Kulit): Proses pelepasan kutikula lama oleh serangga untuk memungkinkan pertumbuhan.
- Nimfa: Tahap imatur pada serangga dengan metamorfosis tidak sempurna (Hemimetabola), mirip dengan dewasa tetapi lebih kecil dan belum bersayap. Dalam konteks ini, merujuk pada stadia pra-dewasa kutu daun.
- Oviposisi: Proses peletakan telur oleh serangga betina.
- Pheromone (Feromon): Senyawa kimia yang dilepaskan oleh suatu organisme untuk memengaruhi perilaku organisme lain dari spesies yang sama.
- Predasi: Hubungan biologis di mana satu organisme (predator) membunuh dan memakan organisme lain (mangsa).
- Predator: Organisme yang memangsa organisme lain.
- Pronotum: Bagian punggung dari segmen toraks pertama pada serangga, seringkali menutupi kepala dari atas.
- Prosternum: Bagian ventral (bawah) dari segmen toraks pertama pada serangga.
- Pupa: Tahap tidak aktif dalam metamorfosis sempurna serangga, di mana larva bertransformasi menjadi dewasa.
- Skutelum (Scutellum): Bagian berbentuk segitiga di antara pangkal elitra pada kumbang.
- Tarsus: Bagian paling ujung dari kaki serangga, seringkali bersegmen dan dilengkapi cakar.
- Tarsal Claw (Cakar Tarsal): Cakar kecil di ujung tarsus yang membantu serangga mencengkeram permukaan.
- Tibia: Bagian kaki serangga di antara femur dan tarsus.
- Ventral: Merujuk pada sisi perut atau bawah suatu organisme.
- Vektor Penyakit Virus: Organisme (dalam hal ini kutu daun) yang dapat menularkan virus dari satu tanaman ke tanaman lain.
- Volatil: Senyawa yang mudah menguap atau berubah menjadi gas.

I. REFERENSI

- Amrullah, S. H. (2019). *Pengendalian hayati (Biocontrol): pemanfaatan serangga predator sebagai musuh alami untuk serangga hama (Sebuah Review).* In Prosiding Seminar Nasional Biologi (Vol. 5, No. 1).
- H. S. Smith. 1919. *On Some Phases of Insect Control by the Biological Method*. Journal of Economic Entomology, Volume 12, Issue 4.
- Habazar, T. dan Yaherwandi. 2006. *Pengendalian Hayati Hama dan Penyakit Tumbuhan.* Andalas University Press. Padang.
- Hawiyah, A. (2023). *Identifikasi dan Pengaruh Pengendalian Hama Kutu Daun Rhopalosiphum maidis (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) pada Pertanaman Jagung*. ResearchGate.
- Hendrival, Purnama Hidayat, Dan Ali Nurmansyah. 2011. *Keanekaragaman Dan Kelimpahan Musuh Alami Bemisia Tabaci (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) Pada Pertanaman Cabai Merah Di Kecamatan Pakem, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.*
- ISAM Academy. (2024). *Advantages and Disadvantages of Biological Control.* ISAM Education.
- Jumar. 2000. *Entomologi Pertanian.* Jakarta: PT Rineka Cipta.
- Muliani, Y., & Srimurni, R. R. (2022). *Parasitoid dan Predator Pengendali Serangga Hama.* Sukabumi: CV Jejak, anggota IKAPI
- Nonci, N., Kalgutny, Hary, S., Mirsam, H., Muis, A., Azrai, M., & Aqil, M. (2019). *Pengenalan Fall Armyworm (Spodoptera frugiperda J.E. Smith) Hama Baru Pada Tanaman Jagung Di Indonesia.* In Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Balai Penelitian Tanaman Serealia (Vol. 73).
- Sandjaja, B. 2007. *Parasitologi Kedokteran Buku I: Protozoologi Kedokteran,Prestasi Pustaka Publisher, Jakarta.*
- Tamimi, Chairul. (2017). *Studi siklus hidup dan Prilaku Kupu-kupu Papilio polytes.* UIN Raden Intan Lampung. Bandar Lampung.
- Wardani N. 2017. *Perubahan Iklim Dan Pengaruhnya Terhadap Serangga Hama.* Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Lampung
- Yustina M.S.W. Pu'u & Syatrawati. 2022. *"Potensi Pengendalian Hayati Hama Spodoptera frugiperda untuk Keberlanjutan Produksi Jagung.*" AGRICA: Journal of Sustainable Dryland Agriculture 15(2): 144–160

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB IV

"Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrem"

Serangga : Semut Gurun (Cataglyphis bombycina)



A. PETUNJUK E-WORKSHEET

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami **Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrim.** Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. Pretest ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet.* Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep **Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrim.**
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi *AR* yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest.* Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. *PRETEST* (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti pretest singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini brtujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.

SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrem - Semut Gurun *(Cataglyphis bombycina*)

Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu memahami prinsip dasar (morfologi, anatomi, fisiologi) pada serangga yang memiliki kemampuan adaptasi pada lingkungan yang ekstrem
2. Peserta didik mampu menerapkan prinsip dasar pada materi adaptasi ekstrem serangga pada kehidupan sehari-hari
3. Peserta didik mampu menganalisis permasalahan serta memberikan solusi terbaik.
4. Peserta didik mampu memvalidasi aktivitas ataupun morfologi dan fisiologi serangga sebagai bentuk adaptasi.
5. Peserta didik mampu membuat konten edukasi terkait serangga yang mampu bertahan hidup pada lingkungan ekstrem.

Alat dan Bahan :

- PC atau laptop atau Gawai
- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

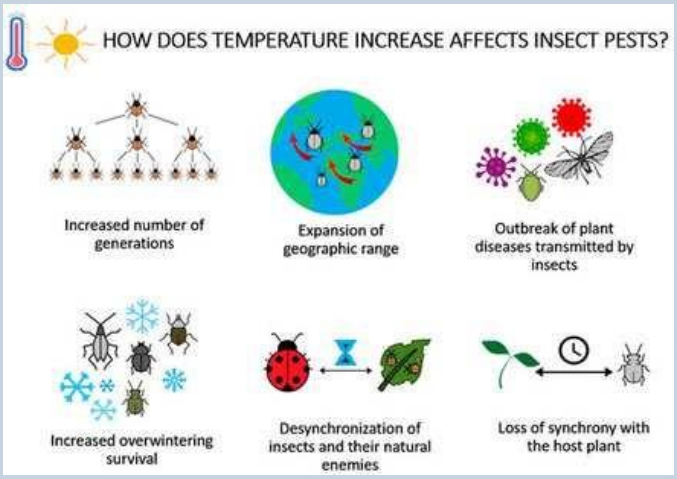
Metode Pembelajaran :

- Simulasi
- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. MATERI SINGKAT 1

1. Adaptasi

Adaptasi merupakan tindakan atau proses mengadaptasi satu hal agar sesuai dengan yang lain, atau sesuai dengan kondisi tertentu, khususnya lingkungan yang baru atau berubah. Kata adaptasi berasal dari bahasa Yunani aptus yang artinya <untuk menyesuaikan= dan kata pertama ditambah awalan ad- artinya "menuju".



Adaptasi Serangga Hama pada Perubahan Iklim

(Sumber : Skendžić *et al*., 2021)

Jadi dapat diartikan bahwa adaptasi adalah suatu kondisi yang melibatkan semacam kecocokan, kebugaran, atau ketepatan. Adaptasi juga mengacu pada kemampuan organisme untuk dapat menyesuaikan diri di berbagai kondisi lingkungan.

Adaptasi hewan seperti serangga terhadap lingkungan mereka merupakan serangkaian proses biologis yang beragam dengan berbagai tujuan, namun tujuan utamanya adalah untuk memastikan kelangsungan hidup spesies secara berkelanjutan. Ini menjadi perbedaan utama antara kemampuan dan adaptasi hewan. Banyak hewan mampu melakukan perilaku tertentu yang tampaknya tidak memiliki fungsi jelas dan mungkin tidak sesuai dengan adaptasi. Semua organisme harus menyesuaikan diri dengan lingkungan mereka, agar dapat bertahan hidup khususnya pada lingkungan ekstrem dan perubahan iklim.

Berikut ada beberapa contoh dari kondisi lingkungan yang ekstrim yaitu :

a. Panas Ekstrem

Panas ekstrem merupakan kondisi dimana meningkatkan suhu rata-rata. Peningkatan suhu ini banyak dihubungkan dengan perubahan iklim global. Perubahan iklim ini memiliki dampak negatif yang luas, terutama pada hewan. Panas ekstrem mempengaruhi kehidupan hewan sehingga hewan harus beradaptasi dengan lingkungan baru, jika hewan tidak dapat beradaptasi maka akan mati. Karakter fenotipik dan genotipik yang memberikan kemampuan adaptif pada hewan, sehingga mereka dapat menghadapi kondisi yang ekstrem.

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

Mekanisme adaptasi ini mendukung kelangsungan hidup hewan di habitat tertentu. Pada dasarnya, adaptasi hewan meliputi perubahan dalam kemampuan morfologi, fisiologi, serta perilaku mereka.

b. Dingin Ekstrem

Kebalikan dari panas, lingkungan ini punya suhu yang sangat rendah, bahkan bisa di bawah titik beku air secara permanen. Contohnya ada di wilayah kutub, gletser, atau dasar laut dalam. Organisme yang hidup di sini harus punya cara khusus buat mencegah selnya membeku.

c. pH Ekstrem

1) Sangat Asam: Lingkungan dengan tingkat keasaman yang sangat tinggi, seperti di sekitar kawah gunung berapi aktif atau drainase air dari tambang tertentu.
2) Sangat Basa: Lingkungan dengan tingkat kebasaan yang sangat tinggi, seperti danau soda.

d. Salinitas Ekstrem (Sangat Asin)

Kondisi ini ditemukan di tempat dengan konsentrasi garam yang sangat tinggi, jauh melebihi air laut biasa. Contoh paling terkenal adalah Laut Mati. Organisme di sini harus mengatasi tekanan osmotik yang luar biasa.

e. Tekanan Ekstrem (Tinggi)

Lingkungan ini berada di bawah tekanan hidrostatik yang sangat besar, seperti di palung laut terdalam. Tekanan di sana bisa ribuan kali lipat dari tekanan atmosfer di permukaan.

f. Radiasi Ekstrem

Lingkungan yang terpapar tingkat radiasi ionisasi yang sangat tinggi, baik dari sumber alami maupun buatan manusia. Beberapa bakteri memiliki kemampuan luar biasa untuk memperbaiki kerusakan DNA akibat radiasi ini.

g. Minim Nutrisi (Oligotrofik)

Kondisi lingkungan yang sangat miskin zat hara atau nutrisi esensial untuk kehidupan. Contohnya adalah di beberapa bagian laut dalam yang jauh dari sumber makanan.

2. Macam-Macam Adaptasi

Berikut adalah beberapa contoh adaptasi hewan terhadap kondisi lingkungan yang berbeda :

a. Adaptasi Morfologi

Adaptasi morfologi merupakan adaptasi berupa perubahan fisik yang berlangsung selama beberapa generasi pada hewan yang meningkatkan kemampuannya untuk bertahan hidup di lingkungan tertentu. Proses adaptasi morfologi terjadi untuk memenuhi tuntutan lingkungan. Contohnya adalah paruh burung pelikan yang besar untuk menangkap ikan, atau rambut tebal pada beruang kutub untuk insulasi di suhu dingin.

b. Adaptasi Fisiologi

Jenis penyesuaian ini berhubungan dengan variasi dalam metabolisme makhluk hidup yang berbeda. Beberapa organ dalam tubuh hewan biasanya beroperasi dengan cara yang berbeda saat ada perubahan tertentu di lingkungan. Dua bentuk adaptasi fisiologis yang paling dikenal adalah hibernasi dan estivasi. Keduanya adalah dua tipe ketidakaktifan yang berlainan di mana laju metabolisme sangat menurun sehingga hewan dapat bertahan hidup tanpa asupan makanan atau minuman. Dalam kedua situasi, suhu umumnya menjadi faktor penentu. Contohnya, beruang berhibernasi di musim dingin dengan menurunkan detak jantung dan suhu tubuh mereka secara drastis untuk menghemat energi, sementara beberapa jenis katak melakukan estivasi dengan menggali ke dalam lumpur saat musim kemarau ekstrem untuk menghindari dehidrasi.

c. Adaptasi Perilaku

Adaptasi perilaku diakui sebagai respons pertama dan terpenting yang diadopsi oleh hewan untuk mengurangi beban panas. Salah satu perubahan perilaku paling cepat dan mendalam yang terlihat pada hewan yang mengalami stres akibat panas adalah pencarian naungan. Hewan yang stres berusaha untuk memperbaiki efek negatif dari beban panas langsung dengan menggunakan naungan kapan pun mereka dapat mengaksesnya. Contohnya, migrasi burung ke daerah yang lebih hangat saat musim dingin tiba, atau mencari teduh saat matahari sangat terik untuk menghindari kepanasan.

E. MATERI SINGKAT 2

1. Adaptasi Semut Gurun *(Cataglyphis bombycina)* Di Lingkungan Ekstrem

Semut gurun *Cataglyphis bombycina*, yang sering disebut "semut perak" karena penampilannya yang mengkilap, adalah contoh luar biasa dari adaptasi serangga terhadap salah satu lingkungan paling ekstrem di Bumi yaitu gurun Sahara yang sangat panas. Mereka aktif mencari makan di suhu permukaan tanah yang bisa mencapai lebih dari 60°C, suhu yang akan mematikan bagi sebagian besar makhluk hidup.



Semut *Gurun*
(Cataglyphis bombycina)
(Sumber : Willot *et al.*, 2016)

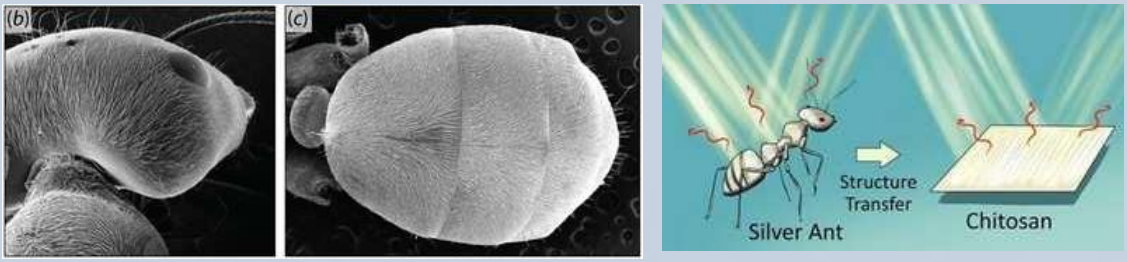
Walau tidak ditemukan di Indonesia, mempelajari semut gurun ini sangat penting dalam konteks ilmiah karena memberikan wawasan mendalam tentang mekanisme adaptasi termal, perilaku navigasi di lingkungan ekstrem, serta potensi aplikasi teknologi seperti desain material reflektif dan robotika berbasis biomimetik. Studi tentang spesies ini juga memperkaya pemahaman kita tentang evolusi serangga dan memungkinkan perbandingan ekologis antara spesies tropis dan gurun, yang bermanfaat dalam pendidikan, penelitian, dan pengembangan ilmu biologi secara global

a. Adaptasi Morfologi

Semut gurun *Cataglyphis bombycina* memiliki dua adaptasi morfologi yang mendukung kemampuan diri dalam menghadapi kondisi lingkungan ekstrim seperti gurun pasir, yaitu :

1) Rambut Perak Reflektif

Rambut Ini adalah adaptasi paling menonjol. Tubuh mereka ditutupi oleh rambut-rambut segitiga berongga yang sangat padat dan mikroskopis.



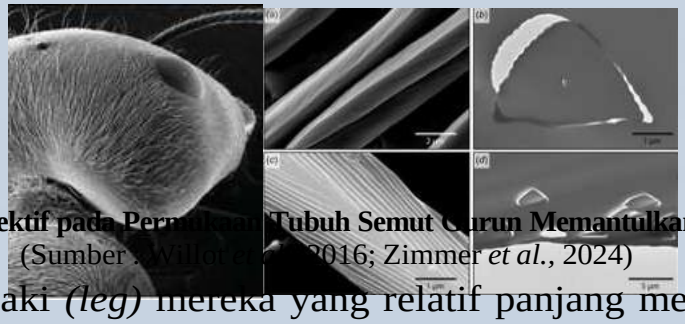
Rambut Perak Reflektif pada Permukaan Tubuh Semut Gurun Memantulkan Panas Matahari

(Sumber : Willot *et al.*, 2016; Zimmer *et al.*, 2024)

Rambut-rambut ini berfungsi ganda yaitu:

- Memantulkan Radiasi Matahari: Struktur dan orientasinya yang unik memantulkan sebagian besar radiasi matahari (khususnya cahaya tampak dan inframerah dekat), mengurangi penyerapan panas.
- Memancarkan Panas: Rambut-rambut ini juga membantu memancarkan panas inframerah dari tubuh semut ke langit yang dingin.

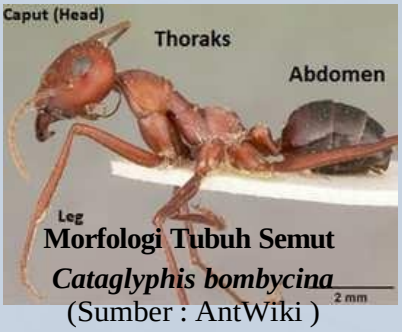
Rambut yang menutupi tubuh semut gurun *C. bombycina* adalah kunci utama bagi mereka untuk bertahan di lingkungan ekstrem. Rambut ini memiliki bentuk segitiga yang unik dengan ujung yang meruncing, dirancang khusus untuk secara efisien memantulkan cahaya matahari. Permukaannya tidak mulus, melainkan bergelombang, terutama di dua sisi atasnya, yang berfungsi sebagai pemantul cahaya yang sangat efektif, sehingga mengurangi jumlah panas yang diserap oleh tubuh semut. Selain itu, semua rambut tersusun rapi dengan orientasi yang seragam dan bagian dasarnya rata menempel pada kulit, memastikan pantulan optimal dan bahkan menciptakan lapisan udara tipis yang bertindak sebagai isolator tambahan. Semua fitur ini bekerja sama untuk menjaga suhu tubuh semut tetap dingin di bawah terik matahari gurun. Gambar (a) menampilkan tampilan permukaan rambut, sedangkan gambar (b) menunjukkan potongan melintangnya.



Rambut Perak Reflektif pada Permukaan Tubuh Semut Gurun Memantulkan Panas Matahari
(Sumber : Willot *et al.*, 2016; Zimmer *et al.*, 2024)

2) Kaki Panjang: Kaki *(leg)* mereka yang relatif panjang mengangkat tubuh mereka dari permukaan tanah yang sangat panas, menjauhkan mereka dari lapisan udara yang paling panas dan bergerak lambat di dekat tanah. Ini menciptakan sedikit ruang udara yang lebih dingin d

Secara keseluruhan morfologi semut gurun *Cataglyphis bombycina* memiliki tubuh yang tersusun atas tiga segmen yaitu caput (kepala), thoraks (dada) dan abdomen (perut).



Morfologi Tubuh Semut *Cataglyphis bombycina*
(Sumber : AntWiki)

Adapun penjelasan lebih detailnya yaitu sebagai berikut :

a) Caput (*Head/* Kepala)

Kepala adalah bagian paling depan tubuh semut. Caput terletak di bagian paling anterior (depan) dari tubuh semut.

Bentuknya relatif besar dan kokoh dibandingkan dengan Toraks, dengan bagian posterior (belakang) yang membulat dan menyempit ke arah anterior.
Kepala semut gurun terdapat beberapa bagian-bagian, yaitu :

- Mandibula (Rahang): Ini adalah struktur seperti penjepit yang digunakan semut untuk menggenggam makanan, membawa benda, membangun sarang, dan bertarung. Dari teks, kita tahu bahwa *C. bombycina* memiliki variasi mandibula, termasuk yang "berbentuk pedang" pada kasta prajurit. Mandibula pada gambar terlihat kuat dan menonjol ke depan.
- Antena: Sepasang antena ini berfungsi sebagai indra peraba, pencium, dan pengecap. Semut menggunakannya untuk berkomunikasi, menemukan makanan, dan mengenali anggota koloni. Antena pada gambar terlihat panjang, ramping, dan bersudut.
- Mata Majemuk (*Compound Eyes*): Sepasang mata yang besar dan menonjol terlihat jelas di kedua sisi kepala. Mata ini terdiri dari ribuan lensa kecil yang memungkinkan semut melihat gerakan dan bentuk. Meskipun penglihatan semut tidak selalu tajam, mata ini penting untuk navigasi.
- Ocelli (Mata Sederhana): Beberapa semut juga memiliki ocelli yang membantu mendeteksi perubahan intensitas cahaya. (Tidak terlihat jelas pada gambar)



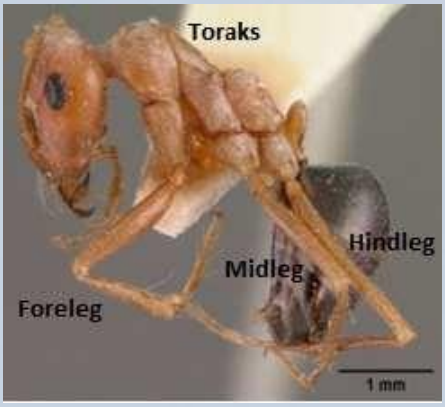
(Su

2) Toraks (*Thoraks*/Dad

Thoraks adalah bagian tengah tubuh semut, tempat kaki-kaki menempel. Ini adalah pusat pergerakan semut. *Thoraks* ada dibagian tengah tubuh semut, menghubungkan Caput dengan Abdomen. Bentuk terlihat lebih kompak dan berotot dibandingkan kepala atau abdomen. Terdiri dari beberapa segmen yang menyatu, membentuk struktur yang kuat sebagai tempat menempelnya kaki. Terdapat beberapa lekukan dan tonjolan di permukaan dorsal (punggung) toraks. Toraks memiliki enam kaki (tiga pasang) yang menempel pada toraks. Kaki-kaki ini digunakan untuk berjalan, berlari, dan memanjat. Kaki belakang *C. bombycina* berperan besar dalam mendorong maju, sedangkan kaki depan membantu menjaga keseimbangan. Kaki-kaki pada gambar terlihat panjang dan ramping.

Kaki semut gurun dibedakan atas tiga pasang, yaitu :

- *Forelegs* (Kaki Depan): Menempel paling dekat dengan kepala.
- *Midlegs* (Kaki Tengah): Menempel di tengah toraks.
- *Hindlegs* (Kaki Belakang): Menempel paling dekat dengan abdomen.
- Setiap kaki terdiri dari beberapa segmen yang dapat ditekuk (koksa, trokanter, femur, tibia, dan tarsus).



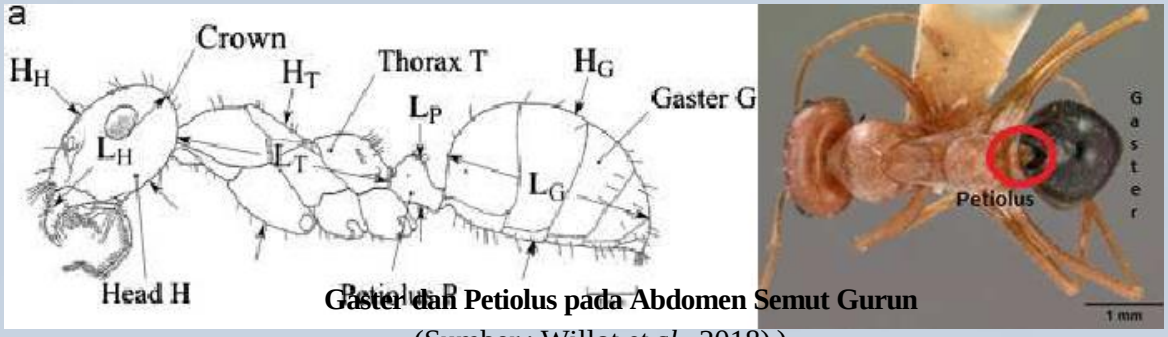
Tiga Pasang Kaki pada Semut Gurun
(Sumber : Wikipedia)

3) Abdomen (Perut)

Abdomen adalah bagian tubuh semut yang terletak di bagian paling posterior (belakang) dari tubuh semut. Bentuknya terlihat lebih besar dan bulat dibandingkan toraks, dan relatif lebih halus permukaannya. Bagian ini menempel pada toraks melalui penyempitan yang disebut petiolus (tidak dilabeli secara eksplisit tetapi terlihat sebagai "pinggang" semut).

Abdomen terbagi juga menjadi beberapa bagian, yaitu:

- Gaster: Ini adalah bagian terbesar dari abdomen yang berisi sebagian besar organ internal semut, seperti sistem pencernaan dan organ reproduksi. Pada semut betina (termasuk ratu dan pekerja), di bagian ujung abdomen terdapat sengat (jika ada) yang merupakan modifikasi dari ovipositor. Pada gambar, gaster terlihat gelap, mengkilap, dan segmented samar.
- Petiolus: Terlihat jelas adanya segmen penghubung yang ramping dan bertangkai antara toraks dan gaster.



Gaster dan Petiolus pada Abdomen Semut Gurun
(Sumber : Willot *et al.,* 2018))

b. Adaptasi Fisiologi

Cataglyphis bombycina memiliki titik lethal panas (suhu mematikan) yang sangat tinggi, sekitar 50-55°C untuk suhu tubuh internalnya, jauh di atas serangga gurun lainnya. Selain itu perilaku termoregulasi seperti mobilitas yang cepat di atas pasir, meminimalkan waktu kontak kaki dengan

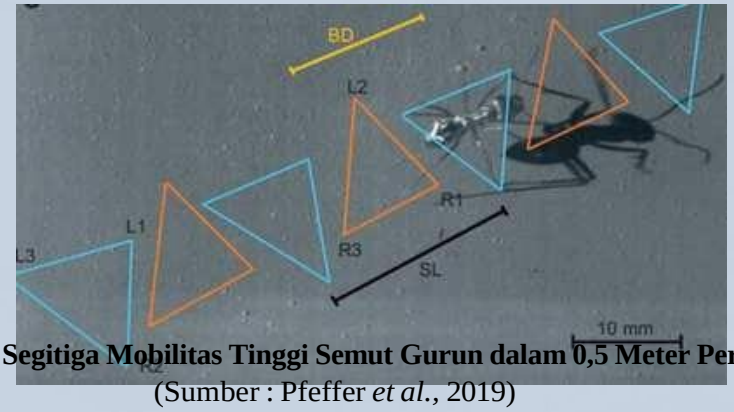
permukaan yang sangat panas. Adapun bentuk adaptasi perilaku yang efektif.

- Orientasi Matahari : Semut gurun menggunakan posisi matahari untuk navigasi pulang ke sarang, yang memungkinkan mereka melakukan perjalanan jauh untuk mencari makan dan kembali tanpa membuang banyak waktu di panas yang ekstrem.
- Penjemuran Cepat (*Heat-Gunning*): Ketika suhu terlalu panas, Semut gurun dapat dengan cepat naik ke benda-benda kecil seperti kerikil untuk mendapatkan sedikit paparan angin, meskipun ini terbatas dan adaptasi utama tetap pada permukaan tubuh.

Semut gurun juga mengalami metabolisme optimal di suhu tinggi. Enzim dan protein dalam tubuh mereka telah berevolusi untuk berfungsi secara optimal pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan kebanyakan serangga lainnya. Contohnya : ekspresi *heat-shock protein* pada semut *C. bombycina* menunjukkan adaptasi fisiologis terhadap stres panas melalui ekspresi HSC70 yang tinggi secara konstitutif (Willot et al., 2018). HSC70 sendiri diekspresikan secara terus-menerus (konstitutif) bahkan dalam kondisi normal untuk melindungi sel dari kerusakan akibat stres panas atau suhu lingkungan meningkat asalkan secara bertahap.

3. Adaptasi Perilaku

Mobilitas yang tinggi disaat suhu tinggi menunjukkan bahwa semut gurun *Cataglyphis bombycina* dapat berjalan dengan kecepatan luar biasa, yaitu 0,5 meter per detik. Hal ini terlihat dari pola "segitiga" atau *tripod gait* dari hasil gambar potongan dari rekaman video berkecepatan sangat tinggi.



Pola Segitiga Mobilitas Tinggi Semut Gurun dalam 0,5 Meter Perdetik
(Sumber : Pfeffer *et al.*, 2019)

F. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……

Kelompok : ……..……

Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan uraikan juga kedalam format doc/pdf.

1. Pertanyaan Pendorong

Jelaskan secara komprehensif bagaimana adaptasi morfologi (misalnya, rambut perak, kaki panjang) pada semut gurun *Cataglyphis bombycina* secara langsung mendukung dan berinteraksi dengan mekanisme fisiologis (toleransi panas, termoregulasi) mereka untuk bertahan hidup di lingkungan gurun yang ekstrem? Sertakan detail mengenai prinsip-prinsip fisik dan biologis yang terlibat dalam interaksi ini

Entomologi Terapan

2. Investigasi Konstruktif

a. Meskipun *Cataglyphis bombycina* memiliki adaptasi luar biasa terhadap panas, diskusikan faktor-faktor apa saja yang dapat membatasi kemampuan adaptasi mereka jika terjadi perubahan iklim global yang signifikan atau peningkatan polusi di habitat gurun mereka? Prediksi potensi dampaknya terhadap kelangsungan hidup spesies ini, dengan mempertimbangkan skenario terburuk dan terbaik.

b. Bandingkan strategi adaptasi *Cataglyphis bombycina* terhadap panas ekstrem dengan strategi adaptasi serangga lain misalnya *Belgica antarctica*, serangga kecil tak bersayap endemik Antartika yang tahan terhadap kondisi ekstrem (dingin ekstrem, kekeringan berlebihan, serta pembekuan parsial) dengan siklus hidup sekitar 2 tahun dan berperan sebagai pengurai utama di ekosistem darat Antartika. Analisislah kesamaan dan perbedaan dalam pendekatan morfologi, anatomi, dan fisiologi untuk bertahan hidup.



Persamaan :

Perbedaan :

3. Otonomi Belajar

Bagaimana studi kasus *Cataglyphis bombycina* dapat diintegrasikan ke dalam kurikulum Biologi di tingkat SMA/MA melalui pendekatan Pembelajaran Berbasis Proyek (PjBL), dengan mengaitkannya pada contoh adaptasi serangga yang juga ditemukan di Indonesia? Berikan contoh konkret aktivitas proyek yang dapat dilakukan peserta didik untuk mencapai tujuan pembelajaran, yaitu mengidentifikasi adaptasi, menganalisis hubungan organisme dengan lingkungannya, menelaah faktor-faktor yang memengaruhi, serta merancang solusi berbasis pemahaman biologis

Judul Proyek:

Tujuan Pembelajaran :

1.
2.
3.
4.
5.

Latar Belakang Proyek:

Deskripsi Produk/Hasil Akhir Proyek:

Rincian Aktivitas Proyek (Per Tahap):

a) Tahap Persiapan Proyek :

b) Tahap Inti Proyek :

c) Tahap Analisis/Evaluasi Proyek :

d) Tahap Akhir Proyek :

Daftar Sumber Referensi :

G. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *posttest* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,



H. GLOSARIUM

- Adaptasi: Kemampuan makhluk hidup untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan tempat hidupnya agar dapat bertahan hidup dan berkembang biak.
- Fisiologi: Cabang ilmu biologi yang mempelajari fungsi-fungsi dan proses vital organisme hidup serta bagian-bagiannya.
- Fenotipik: Karakteristik atau sifat-sifat yang dapat diamati dari suatu organisme, yang merupakan hasil interaksi antara genotip (susunan genetik) dan lingkungan.
- Genetik: Berhubungan dengan gen atau faktor keturunan.
- Habitat: Lingkungan alami tempat suatu organisme atau populasi hidup dan berkembang biak.
- Metabolisme Optimal: Proses kimia yang terjadi di dalam sel hidup untuk mempertahankan kehidupan, yang berjalan paling efisien atau terbaik pada suhu tertentu.
- Morfologi: Cabang ilmu biologi yang mempelajari bentuk dan struktur organisme serta bagian-bagiannya.
- Orientasi: Kemampuan untuk menentukan posisi atau arah relatif terhadap suatu titik acuan.
- Osmotik: Berhubungan dengan osmosis, yaitu perpindahan pelarut (biasanya air) melalui membran semipermeabel dari larutan dengan konsentrasi zat terlarut rendah ke larutan dengan konsentrasi zat terlarut tinggi.
- Penjemuran Cepat (Heat-Gunning): Perilaku di mana semut yang terlalu panas bergerak cepat bolak-balik ke benda-benda kecil seperti kerikil untuk mendapatkan sedikit paparan angin, meskipun ini terbatas, untuk adaptasi suhu tubuh. Ini adalah strategi untuk membuang panas.
- Reflektif: Memiliki sifat memantulkan cahaya atau panas.
- Sporadis: Terjadi secara tidak teratur atau sesekali; tersebar.
- Termoregulasi: Proses pengaturan suhu tubuh suatu organisme untuk menjaga suhu internal tetap stabil meskipun ada perubahan suhu lingkungan.
- Titik Lethal Panas: Suhu tertinggi yang dapat ditoleransi oleh suatu organisme sebelum mengalami kerusakan serius atau kematian.
- Toleransi: Kemampuan suatu organisme untuk bertahan hidup dan berfungsi dalam kondisi lingkungan yang mungkin tidak ideal atau ekstrem.

Entomologi Terapan

H. REFERENSI

- André, B. (2019). *Adaptation of thermal scavenging ants to severe heat-conditions (Doctoral dissertation, Spanish National Research Council).*
- Aron, S., & Wehner, R. (2021). *Cataglyphis. In Encyclopedia of social insects (pp. 217-223).* Cham: Springer International Publishing.
- Lenoir, A., Aron, S., Cerda, X., & Hefetz, A. (2009). *Cataglyphis desert ants: a good model for evolutionary biology in Darwin¿ s anniversary year¿ A review.*
- Liu, M., Chen, B., Zhang, D., & Chen, J. (2023). *Spectral characteristics of biomimetic micro-nano structures derived from saharan silver ants—a simulation study.* Coatings, 13(1), 85.
- Perez, R., Benbachir, M., Decroo, C., Mascolo, C., Wattiez, R., & Aron, S. (2023). *Cataglyphis desert ants use distinct behavioral and physiological adaptations to cope with extreme thermal conditions.* Journal of Thermal Biology, 111, 103397.
- Perez, R., de Souza Araujo, N., Defrance, M., & Aron, S. (2021). *Molecular adaptations to heat stress in the thermophilic ant genus Cataglyphis*. Molecular Ecology, 30(21), 5503-5516.
- Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). *Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants.* Science, 349(6245), 298-301.
- Willot, Q., Simonis, P., Vigneron, J. P., & Aron, S. (2016). *Total internal reflection accounts for the bright color of the Saharan silver ant.* PLoS One, 11(4), e0152325.
- Willot, Q., Gueydan, C., & Aron, S. (2017). *Proteome stability, heat hardening and heat-shock protein expression profiles in Cataglyphis desert ants.* Journal of Experimental Biology, 220(9), 1721-1728.

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB V

"Serangga sebagai Vektor Penyakit"

Serangga : Nyamuk Aedes aegypti



A. PETUNJUK E-WORKSHEET

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "Serangga sebagai Vektor Penyakit"**.** Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet.* Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep "Serangga sebagai Vektor Penyakit"**.**
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi *AR* yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest.* Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. PRETEST (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti pretest singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.



SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Serangga sebagai Vektor Penyakit.
Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu mengidentifikasi tempat tempat berkembang biak nyamuk guna dan langkah langkah eliminasi habitat tersebut.
2. Peserta didik mampu menjelaskan siklus hidup nyamuk dan bagaimana hal tersebut berkontribusi pada penyebaran penyakit.
3. Peserta didik mampu menggunakan informasi untuk mengedukasi masyarakat tentang peran aktif mereka dalam pengendalian vektor nyamuk.
4. Peserta didik mampu mampu menganalisis perilaku yang mempengaruhi transmisi penyakit kepada manusia.
5. Peserta didik mampu mengevaluasi cara cara untuk mengendalikan populasi nyamuk guna mencegah wabah penyakit
6. Peserta didik mampu mengembangkan keterampilan dalam melakukan surveilans dan pelaporan kasus penyakit yang melibatkan vektor nyamuk.

Alat dan Bahan :

- PC atau laptop atau Gawai
- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

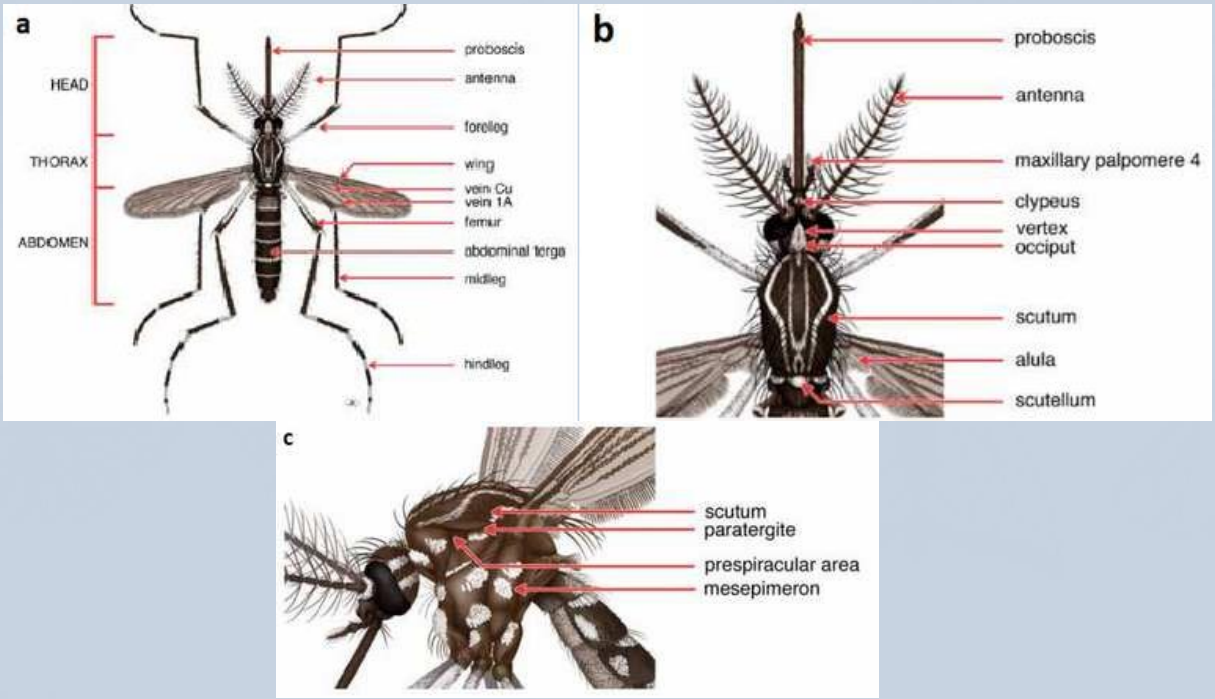
Model Pembelajaran : *Project Based Learning*
Metode Pembelajaran :

- Simulasi
- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. MATERI SINGKAT 1

1. Morfologi *Aedes Aegypti*

Nyamuk dewasa *Aedes aegypti* merupakan serangga kecil berwarna gelap dengan tanda putih khas pada tubuh dan kaki. Kepalanya ditutupi sisik datar berwarna putih keperakan pada bagian vertex (puncak kepala) pada kedua jenis kelamin, sementara bagian clypeus tidak bersisik sehingga tampak gelap. Toraks menunjukkan pola khas berbentuk kecapi (lyre) dari sisik putih keperakan dan garis-garis longitudinal di bagian tengah. Sayap berwarna bening dengan venasi bersisik halus tanpa bercak putih. Kaki panjang dan ramping dengan pola gelang-gelang putih mencolok, serta perbedaan bentuk cakar antara jantan dan betina. Abdomen ramping dilapisi sisik gelap, sedangkan antena dan palpus maksilaris menunjukkan perbedaan morfologi khas antara jantan (antena plumose, palpus panjang) dan betina (antena pilose, palpus pendek).”Gambar 1. 3 (a) menunjukkan tampak dorsal nyamuk betina dewasa *Aedes aegypti*, (b) menampilkan tampak dorsal kepala dan toraks, (c) memperlihatkan tampak lateral kepala, toraks, dan sebagian abdomen, (d) menggambarkan tampak anterior kaki belakang dari Aedes *aegypti* dewasa.



Struktur Morfologi Tubuh Nyamuk *Aedes aegypti*

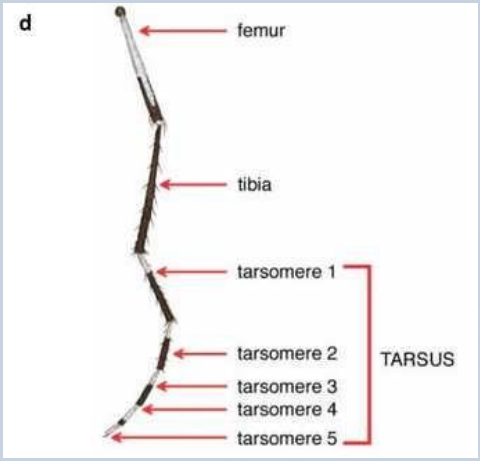
(Sumber: Rueda, 2020)

Entomologi Terapan

2. Siklus Hidup *Aedes aegypti*

Aedes aegypti mengalami metamorfosis sempurna yang terdiri dari empat tahap utama: telur, larva, pupa, dan dewasa (imago).

Setiap tahap memiliki karakteristik morfologi dan fisiologi yang spesifik serta peran penting dalam siklus hidup nyamuk. Adapun tahapan suklus hidup nyamuk ini, yaitu:



Struktur Morfologi Kaki Nyamuk *Aedes aegypti*
(Sumber: Rueda, 2020)

a. Telur

- Nyamuk betina Aedes aegypti meletakkan telurnya pada permukaan dinding bagian dalam wadah yang berisi air bersih, terutama pada tempat-tempat buatan manusia seperti bak mandi, ember, ban bekas, vas bunga, atau wadah lain yang menampung air tergenang.
- Telur berbentuk lonjong, berwarna hitam, dan sangat tahan kekeringan; dapat bertahan berminggu-minggu hingga terendam air untuk menetas.
- Satu betina dapat menghasilkan 100–200 telur dalam satu siklus oviposi.

b. Larva

- Setelah terendam air, telur menetas menjadi larva dalam waktu 1–3 hari.
- Larva hidup di air, aktif makan, dan mengalami empat instar (stadium perkembangan larva) sebelum menjadi pupa.
- Ciri morfologis larva A. *aegypti*: tubuh silindris, *siphon* (alat pernapasan) panjang, dan gerakan aktif di permukaan air (Rao, 2020).
- Lama stadium larva sangat dipengaruhi suhu dan ketersediaan makanan, biasanya 4–7 hari pada suhu optimal (27–32°C). c. Pupa 1)
- Larva berubah menjadi pupa setelah instar keempat.

c. Pupa

Larva berubah menjadi pupa setelah instar keempat

- Pupa tidak makan, berbentuk koma, dan sangat aktif berenang jika terganggu.
- Stadium pupa berlangsung 1–3 hari sebelum berubah menjadi nyamuk dewasa.

d. Dewasa (Imago)

- Setelah keluar dari pupa, nyamuk dewasa membutuhkan waktu beberapa jam untuk mengeringkan sayap dan tubuh sebelum dapat terbang.
- Betina membutuhkan darah untuk pematangan telur, sedangkan jantan hanya mengonsumsi nektar atau sumber gula lainnya.

E. MATERI SINGKAT 2

1. Mekanisme Penyebaran DBD Melalui *Aedes Aegypti*

Nyamuk *Aedes aegypti* menginfeksi manusia dengan virus Demam Berdarah Dengue (DBD) melalui proses yang spesifik, yaitu:

a. Nyamuk Terinfeksi: Proses dimulai ketika nyamuk betina *Aedes aegypti* yang belum terinfeksi menggigit manusia yang sudah terinfeksi virus *Dengue*. Saat menghisap darah, nyamuk tersebut juga ikut menghisap virus *Dengue* yang ada di dalam darah manusia tersebut.

b. Perkembangan Virus dalam Nyamuk (Masa Inkubasi Ekstrinsik): Setelah virus masuk ke tubuh nyamuk, virus tersebut tidak langsung bisa menular. Virus *Dengue* akan bereplikasi (berkembang biak) dan menyebar ke seluruh tubuh nyamuk, termasuk ke kelenjar air liurnya. Proses ini membutuhkan waktu sekitar 8-12 hari, yang disebut masa inkubasi ekstrinsik. Lamanya waktu ini sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan; pada suhu yang lebih hangat, virus dapat berkembang lebih cepat.

c. Nyamuk Menjadi Infeksius dan Menularkan ke Manusia Lain: Setelah virus mencapai kelenjar air liur nyamuk, nyamuk tersebut menjadi infeksius, artinya ia mampu menularkan virus.



Siklus Penyebaran Demam Dengue oleh Nyamuk *Aedes aegypti*
(Sumber: de Almeida, 2025)

Entomologi Terapan

Ketika nyamuk infeksius ini menggigit manusia lain yang sehat, ia akan menyuntikkan sedikit air liurnya (yang kini mengandung virus *Dengue*) ke dalam aliran darah manusia tersebut, sehingga menginfeksi manusia yang digigit. Gambar tersebut secara visual menggambarkan bagaimana virus Dengue menyebar dari nyamuk ke manusia dan sebaliknya, membentuk sebuah lingkaran penularan.Prosesnya dimulai dari nyamuk *Aedes aegypti*, atau *Aedes albopictus*. yang mengalami reproduksi seksual untuk menghasilkan keturunan. Nyamuk betina kemudian perlu mengisap darah, yang esensial untuk perkembangan telurnya. Jika nyamuk betina yang belum terinfeksi ini menggigit manusia yang sedang sakit Dengue (dengan demam akut), maka terjadilah infeksi virus Dengue pada nyamuk.

Setelah nyamuk terinfeksi dan virus mulai berkembang biak di dalam tubuhnya, nyamuk tersebut menjadi mampu menularkan virus. Ketika nyamuk infeksius ini menggigit manusia lain yang sehat, ia melakukan penularan horizontal. Akibatnya, terjadi infeksi pada manusia yang disebabkan oleh gigitan nyamuk yang terinfeksi, yang kemudian memulai babak infeksi selanjutnya pada populasi manusia.

Di sisi lain, setelah mengisap darah dan mematangkan telur, nyamuk betina akan meletakkan telurnya satu per satu pada dinding wadah yang lembap, sedikit di atas permukaan air (bukan langsung di air). Telur ini kemudian akan menetas dan berkembang menjadi nyamuk baru yang belum terinfeksi, melanjutkan siklus hidup mereka. Diagram ini juga menunjukkan bahwa penularan vertikal pada manusia sangat jarang terjadi dari ibu hamil ke bayi, namun penularan vertikal alami dapat terjadi pada nyamuk, di mana virus bisa diturunkan langsung dari induk nyamuk ke telurnya, memastikan virus tetap ada di populasi nyamuk.

2. Pengaruh Suhu Terhadap Siklus Hidup Dan Aktivitas *Aedes Aegypti*

Suhu lingkungan adalah faktor krusial yang memengaruhi setiap tahapan perkembangan dan tingkat kelangsungan hidup Aedes aegypti (Freitas et al., 2024). Pada suhu optimal, yaitu sekitar 27–32°C, siklus hidup nyamuk ini akan berlangsung lebih cepat. Hal ini terlihat dari peningkatan laju penetasan telur, percepatan pertumbuhan larva, serta peningkatan frekuensi aktivitas nyamuk dewasa, termasuk perilaku menggigit.

Sebaliknya, pada suhu rendah, perkembangan *Aedes aegypti* akan melambat secara signifikan, dan tingkat kelangsungan hidup pada setiap tahap pun akan menurun. Selain suhu, kelembapan juga memainkan peran vital, terutama dalam menjamin kelangsungan hidup telur yang rentan terhadap kekeringan, serta mendukung aktivitas nyamuk dewasa dalam mencari inang dan berkembang biak. Oleh karena itu, fluktuasi suhu dan kelembaban di lingkungan tropis sangat memengaruhi dinamika populasi dan potensi penularan penyakit oleh *Aedes aegypti.*

3. Ritme Biologis dan Aktivitas Harian *Aedes Aegypti*

Aedes aegypti dikenal sebagai vektor penyakit yang bersifat diurnal, menunjukkan puncak aktivitas menggigit pada pagi dan sore hari. Pola aktivitas harian ini diatur oleh dua gen utama pengatur ritme sirkadian (Freitas et al., 2024). Gen-gen ini memungkinkan nyamuk untuk menyelaraskan waktu aktivitas dan perilaku mencari inang dengan fluktuasi suhu dan cahaya, menjadikannya sangat adaptif di wilayah tropis. Kemampuan adaptasi ini krusial karena suhu tinggi mempercepat laju metabolisme nyamuk dan mempersingkat siklus *gonotrofik* (adalah rangkaian proses pada nyamuk betina yang meliputi makan darah, pematangan telur di ovarium, dan peletakan telur, kemudian diulang kembali antara dua kali bertelur), meningkatkan frekuensi gigitan dan potensi penularan penyakit. Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang mekanisme genetik di balik ritme sirkadian ini penting untuk mengembangkan strategi pengendalian vektor yang lebih efektif, terutama dalam menghadapi perubahan iklim global yang dapat memengaruhi distribusi geografis dan pola aktivitas nyamuk.

4. Karakteristik Habitat Perkembangbiakan *Aedes Aegypti*

Aedes aegypti memiliki preferensi habitat yang kuat pada wadah air buatan manusia, menjadikannya nyamuk yang sangat terkait dengan lingkungan perumahan. Habitat utama larva nyamuk ini meliputi drum, ember, ban bekas, tempurung kelapa, dan berbagai genangan air lain di sekitar rumah, baik di dalam maupun di pekarangan. Kondisi mikroklimat yang ideal untuk perkembangan larva *Aedes aegypti* meliputi suhu air berkisar 25-30°C, dengan pH 6,4-7,6, dan kelembapan udara 64-83%.

Larva nyamuk ini juga cenderung ditemukan di tempat yang teduh, gelap, dan lembap, seperti di dalam rumah atau area pekarangan yang terlindung dari paparan sinar matahari langsung. Karakteristik ini membedakannya dari spesies vektor lain seperti *Aedes albopictus*, yang lebih dominan ditemukan di luar rumah atau di daerah terbuka dengan vegetasi padat. Preferensi habitat intra-domestik ini menjadi kunci dalam memahami efisiensi *Aedes aegypti* sebagai penular penyakit di perkotaan.

Aedes aegypti sangat menyukai iklim tropis dan subtropis yang hangat, lembap, dan memiliki curah hujan cukup, seperti yang ditemukan di negara seperti Indonesia. Kondisi iklim ini sangat mendukung siklus hidup Aedes aegypti, sehingga Indonesia, Brazil, dan India menjadi beberapa negara dengan beban kasus demam berdarah dengue (DBD) tertinggi di dunia.

5. Distribusi Geografis dan Faktor Lingkungan *Aedes Aegypti*

Aedes aegypti tersebar luas di wilayah tropis di seluruh dunia; di Indonesia, tersebar di seluruh wilayah. Populasi nyamuk ini sangat dipengaruhi oleh sejumlah variabel lingkungan, seperti curah hujan, suhu,

kepadatan penduduk, dan tutupan lahan. Faktor-faktor ini secara kolektif berkontribusi pada penyebaran dan proliferasi vektor penyakit ini.

Aedes aegypti memiliki jarak terbang yang relatif terbatas, umumnya sekitar 100–200 meter. Jarak terbang yang pendek ini menjadi faktor utama pola penyebaran kasus DBD, yang cenderung terkonsentrasi di sekitar rumah atau area dengan keberadaan larva nyamuk. Memahami keterkaitan antara perilaku nyamuk, lingkungan, dan pola penularan penyakit sangat penting untuk merancang strategi pengendalian vektor yang lebih efektif

6. Peran Epidemiologis Global

Aedes aegypti menghadirkan tantangan epidemiologis yang signifikan dalam upaya pengendalian penyakit, terutama karena dua karakteristik utamanya. Pertama, perilaku antropofilik nyamuk ini kecenderungannya untuk menggigit manusia dan adaptasi genetik yang kuat menjadikan *Aedes aegypti* sangat efisien sebagai vektor utama penyakit *arbovirus* seperti *dengue* dan chikungunya di lingkungan perkotaan. Kedekatannya dengan manusia memfasilitasi penularan virus secara cepat.

Kemampuan nyamuk ini untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan juga menjadi hambatan besar dalam pengendalian vektor. *Aedes aegypti* mampu menyesuaikan diri dengan urbanisasi yang pesat, perubahan iklim global, dan berbagai intervensi manusia (seperti penggunaan insektisida, yang menyebabkan mereka menjadi resisten). Adaptasi cepat ini menyulitkan strategi pengendalian yang ada, sering kali membuat upaya yang telah dilakukan menjadi kurang efektif seiring waktu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif dan inovatif untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh nyamuk ini.

7. Kompleksitas Penularan

Aedes aegypti dikenal sebagai vektor yang sangat efisien dalam menularkan virus, baik melalui infeksi tunggal (satu jenis virus) maupun koinfeksi (dua atau lebih virus secara bersamaan). Studi eksperimental yang dilakukan oleh Le Coupanec et al. (2021) secara mencengangkan menunjukkan bahwa tingkat infeksi nyamuk ini terhadap kombinasi virus arbovirus dapat mencapai 100%. Ini berarti satu individu nyamuk *Aedes aegypti* berpotensi membawa dan menularkan lebih dari satu jenis virus ke manusia dalam satu kali gigitan. Kondisi ini secara signifikan meningkatkan kompleksitas epidemiologi penyakit arbovirus.

Selain itu, kemampuan koinfeksi ini juga dapat memperluas spektrum gejala klinis yang muncul pada manusia, karena individu yang terinfeksi mungkin menunjukkan gejala dari beberapa penyakit secara bersamaan, sehingga mempersulit diagnosis dan penanganan. Selain *Aedes aegypti*, spesies *Aedes albopictus* juga tercatat menularkan berbagai penyakit arbovirus seperti chikungunya dan Zika, serta menjadi vektor sekunder untuk demam berdarah dengue.



Aedes aegyptii dan Aedes albopictus
(Sumber : Okafor, 2016)

8. Implikasi Epidemiologis

Aedes aegypti menghadirkan tantangan epidemiologis yang signifikan dalam upaya pengendalian penyakit, terutama karena dua karakteristik utamanya. Pertama, perilaku antropofilik nyamuk ini, kecenderungannya untuk menggigit manusia dan adaptasi genetik yang kuat menjadikan *Aedes aegypti* sangat efisien sebagai vektor utama penyakit arbovirus seperti *dengue*, chikungunya, dan Zika di lingkungan perkotaan. Kedekatannya dengan manusia memfasilitasi penularan virus secara cepat.

Kemampuan nyamuk ini untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan juga menjadi hambatan besar dalam pengendalian vektor. *Aedes aegypti* mampu menyesuaikan diri dengan urbanisasi yang pesat, perubahan iklim global, dan berbagai intervensi manusia (seperti penggunaan insektisida). Adaptasi cepat ini menyulitkan strategi pengendalian yang ada, sering kali membuat upaya yang telah dilakukan menjadi kurang efektif seiring waktu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif dan inovatif untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh nyamuk ini.

9. Transmisi Virus Dan Koinfeksi

Aedes aegypti dikenal memiliki kemampuan unik untuk menularkan lebih dari satu jenis virus secara bersamaan, sebuah fenomena yang disebut koinfeksi. Nyamuk ini dapat membawa virus dengue, chikungunya, Zika, dan yellow fever sekaligus. Studi oleh Le Coupanec et al. (2021) menunjukkan bahwa koinfeksi ini bukan sekadar keberadaan ganda virus; ia secara signifikan memengaruhi kompetensi vektor nyamuk, yaitu kemampuannya untuk menularkan patogen, serta berdampak pada kelangsungan hidup nyamuk itu sendiri. Lebih lanjut, koinfeksi berpotensi meningkatkan risiko epidemi penyakit campuran, di mana masyarakat dapat terjangkit dua atau lebih penyakit arbovirus secara simultan, memperparah beban kesehatan publik. Kompleksitas interaksi antara berbagai jenis virus di dalam tubuh nyamuk vektor ini menjadi tantangan besar dalam upaya pengendalian penyakit arbovirus di seluruh dunia.

10. Perilaku Swarming Dan Reproduksi

Perilaku swarming pada nyamuk jantan, yang umum pada beberapa spesies seperti Anopheles, dipicu oleh rangsangan olfaktori dan akustik sehingga jantan membentuk kelompok terbang terkoordinasi untuk mendeteksi betina (Gesto et al., 2024). Selama proses ini, terjadi peningkatan ekspresi gen yang mendukung aktivitas otot dan penurunan gen rumah tangga, mengoptimalkan mobilitas dan responsivitas.

Berbeda dengan Anopheles, Aedes tidak membentuk swarm besar; pertemuan pasangan biasanya terjadi di sekitar tempat berkembang biak atau dekat inang dengan bantuan isyarat visual, olfaktori, dan akustik.

11. Pengendalian Vektor Dengan Fitokimia

Pengendalian vektor *Aedes aegypti* secara konvensional menghadapi tantangan berupa resistensi insektisida dan dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, fitokimia dari tanaman obat dikaji sebagai alternatif ramah lingkungan yang berpotensi efektif. Beberapa penelitian melaporkan bahwa ekstrak daun *Lantana camara*, *Catharanthus roseu*s, dan Ficus religiosa memiliki aktivitas larvisidal dan pupisidal terhadap Aedes aegypti, dengan *C. roseus* menunjukkan efektivitas tinggi (LC_{50}: 78,56– 228,63 ppm) (Rao, 2020). Kandungan alkaloid seperti catharanthine, tabersonine, dan ajmalicine diduga berperan sebagai senyawa aktif yang dapat dikembangkan sebagai larvisida alami.

Meski demikian, penggunaan fitokimia sebaiknya ditempatkan sebagai bagian dari strategi pengendalian vektor terpadu yang lebih berkelanjutan. Selain pendekatan biologis dan fitokimia, upaya pengendalian juga mencakup manajemen lingkungan, terutama penghilangan tempat perindukan melalui gerakan 3M Plus (Menguras, Menutup, dan Mendaur ulang wadah + upaya tambahan seperti penggunaan larvasida dan pemantauan jentik). Strategi ini bertujuan memutus siklus hidup nyamuk secara efektif, aman, dan berkelanjutan dengan melibatkan peran aktif masyarakat.

F. MATERI SINGKAT 3

1. Pengendalian Vektor Terpadu (*IVM*) Dan Pengendalian Nyamuk Terpadu (*IMM*)

Integrated Vector Management (IVM) atau Pengendalian Vektor Terpadu adalah sebuah kerangka kerja strategis global yang ditetapkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO). Kerangka ini bertujuan untuk mengendalikan vektor pembawa penyakit, seperti nyamuk, lalat, dan tikus, secara efektif, efisien, dan berkelanjutan. *IVM* menekankan pengambilan keputusan berbasis bukti, kolaborasi lintas sektor, serta mobilisasi masyarakat sebagai kunci keberhasilan. Dalam konteks pengendalian nyamuk, kerangka kerja ini diimplementasikan melalui pendekatan yang lebih spesifik, yang dikenal sebagai *Integrated Mosquito Management* (*IMM)* (WHO, 2004). Dengan kata lain, *IMM* adalah aplikasi praktis dari prinsip-prinsip *IVM* yang difokuskan khusus pada nyamuk sebagai target utama.

Sebagai implementasi dari kerangka kerja *IVM, IMM* adalah pendekatan strategis dan komprehensif yang dirancang untuk mengendalikan populasi nyamuk secara efektif (Rochlin *et al.,* 2012). Pendekatan ini tidak mengandalkan satu metode, melainkan mengintegrasikan berbagai pilar pengendalian yang saling melengkapi dan disesuaikan dengan kondisi lokal. Tujuan utama *IMM* adalah menekan populasi nyamuk untuk memutus rantai penularan penyakit seperti Demam Berdarah Dengue (DBD), malaria, dan chikungunya, sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Landasan utama dari *IMM* adalah penggunaan metode yang paling efisien dan ekonomis, dengan menempatkan eliminasi sumber air tergenang sebagai prioritas tertinggi. Eliminasi air tergenang, seperti menguras bak mandi atau membuang kaleng bekas, secara langsung menghancurkan habitat perkembangbiakan nyamuk. Ini mencegah telur nyamuk menetas menjadi jentik, dan jentik berkembang menjadi nyamuk dewasa (Jaison & Khrishnan, 2024). Dengan memutus siklus hidup ini pada tahap paling rentan (telur dan jentik), jumlah populasi nyamuk dewasa dapat dikurangi secara drastis sebelum mereka sempat menggigit dan menularkan penyakit.

Pilar-pilar utama *IMM,* yang selaras dengan panduan global WHO (2004), mencakup:

a. Pengendalian Sumber (*Source Reduction*)

Pilar ini adalah fondasi *IMM* yang bersifat proaktif, dengan fokus utama pada eliminasi sumber air tergenang. Nyamuk membutuhkan air

untuk berkembang biak, sehingga menghilangkan tempat perindukan yang mampet, dan menata lanskap agar tidak tercipta genangan air *(stagnant water)*. Metode ini lebih ekonomis daripada membeli dan mengaplikasikan insektisida kimiawi secara rutin yang biayanya mahal. Alih-alih membeli bahan kimia, sumber daya bisa dialokasikan untuk edukasi dan mobilisasi masyarakat, yang memberikan dampak jangka panjang.

b. Pengendalian Biologis (*Biological Control)*

Pengendalian biologis memanfaatkan musuh alami nyamuk untuk menekan populasinya. Metode ini dianggap ramah lingkungan dan merupakan alternatif yang baik untuk mengurangi ketergantungan pada bahan kimia. Salah satu caranya adalah dengan mengintroduksi ikan pemakan jentik, seperti ikan cupang atau guppy, ke dalam penampungan air yang sulit dikuras (Ghosh *et al.*, 2011). Selain itu, hasil penelitian oleh Davis *et al* (2021) menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) juga dapat digunakan sebagai agen biologi yang secara spesifik menghasilkan toksin untuk membunuh jentik nyamuk, tanpa membahayakan manusia atau organisme lain.





Guppy Fish Memakan Larva Nyamuk
(Sumber : Josh Guppy Fish)

c. Pengendalian Kimiawi (*Chemical Control)*

Pilar ini adalah opsi pelengkap dan menjadi pilihan terakhir dalam IMM. Penggunaan bahan kimia harus diterapkan secara selektif, terukur, dan hanya saat metode lain tidak memadai atau dalam situasi darurat seperti terjadinya KLB (Kejadian Luar Biasa). Pengendalian kimiawi mencakup penggunaan larvasida untuk membunuh jentik nyamuk di tempat perindukan yang tidak dapat dieliminasi secara fisik, serta penggunaan insektisida melalui penyemprotan (*fogging*) untuk membunuh nyamuk dewasa (Berube, 2023). Namun, penting untuk diingat bahwa penggunaan kimiawi yang berlebihan dapat menyebabkan resistensi nyamuk dan berpotensi merusak lingkungan.

d. Perlindungan Pribadi (*Personal Protection)*

Perlindungan pribadi berfokus pada tindakan individu untuk mencegah gigitan nyamuk, yang berfungsi sebagai lini pertahanan terakhir. Langkah-langkahnya meliputi penggunaan kelambu saat tidur, mengaplikasikan repelan atau losion anti-nyamuk pada kulit, serta mengenakan pakaian lengan panjang dan celana panjang saat beraktivitas di luar ruangan (Stürchler, 2008). Pemasangan kasa nyamuk (*Insect screen)* pada jendela



Kelambu Tidur (*Mosquito Net)*
(Sumber: Amazon.in)



Kasa Nyamuk Jendela *(Insect Screen)*
(Sumber: rumahmaterial.com)

dan ventilasi juga merupakan cara yang efektif untuk mencegah nyamuk masuk ke dalam rumah.

e. Edukasi dan Partisipasi Masyarakat (*Public education*)

Pilar terpenting dalam pengendalian nyamuk adalah memastikan tidak adanya air tergenang di lingkungan yang dapat menjadi tempat perindukan. Langkah ini merupakan kunci keberlanjutan dan keberhasilan *Integrated Mosquito Management* (*IMM*) dalam jangka panjang. Tanpa keterlibatan aktif dan kesadaran masyarakat, seluruh upaya pengendalian tidak akan optimal. Oleh karena itu, diperlukan edukasi berkelanjutan untuk menanamkan pemahaman yang benar tentang siklus hidup nyamuk, risiko penularan penyakit, serta metode pengendalian yang tepat. Melalui mobilisasi komunitas, masyarakat didorong untuk terlibat dalam kegiatan rutin seperti gotong royong membersihkan lingkungan dan melaksanakan program 3M Plus (Menguras, Menutup, Mengubur, serta upaya tambahan lain seperti penggunaan larvasida atau pemantauan jentik). Upaya kolektif ini menjaga lingkungan tetap bersih dan bebas dari sarang nyamuk, sehingga mampu menekan risiko penularan penyakit secara berkelanjutan (Priwahyuni & Ropita, 2014)

Demikian, dapat disimpulkan bahwa *Integrated Vector Management* (*IVM)* merupakan kerangka kerja strategis global yang menyediakan landasan ilmiah untuk pengendalian vektor secara menyeluruh. Di dalam kerangka tersebut, *Integrated Mosquito Management (IMM)* adalah implementasi praktis yang fokus secara spesifik pada nyamuk. Kesuksesan *IMM* sangat bergantung pada pendekatan terpadu yang memprioritaskan eliminasi sumber air tergenang. Melalui kombinasi pengendalian fisik, biologis, kimiawi yang bijak, serta perlindungan pribadi, dan didukung oleh edukasi dan partisipasi masyarakat, *IMM* menjadi strategi yang paling efektif dan berkelanjutan untuk menekan populasi nyamuk dan mencegah penularan penyakit.

G. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……

Kelompok : ……..……

Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan uraikan juga dalam format doc/pdf.

1. Pertanyaan Pendorong

a. Jelaskan apa itu *Aedes aegypti* dan mengapa nyamuk ini disebut sebagai vektor utama penyakit Demam Berdarah Dengue (DBD)? Jelaskan peran spesies ini dalam epidemiologi global!

SCAN HERE

CLICK HERE



E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

b. Identifikasi siklus hidup *Aedes aegypt*i dari telur hingga dewasa dengan mencantumkan durasi setiap tahap. Mengapa penting untuk memahami siklus hidup ini dalam konteks pengendalian penyakit? Berikan contoh langkah- langkah nyata yang dapat diambil masyarakat untuk mengeliminasi salah satu tahap siklus hidup *Aedes aegypti* di lingkungan mereka



2. Investigasi Konstruktif

a. Diskusikan perilaku antropofilik *Aedes aegypti* dan bagaimana hal ini mempengaruhi penyebaran penyakit. Apa yang dapat dilakukan untuk mengurangi kontak antara manusia dan nyamuk ini?

b. Jelaskan bagaimana curah hujan, suhu udara, dan kelembapan dapat mempengaruhi perilaku bertelur dan siklus hidup nyamuk Aedes aegy p ti menurut artikel tersebut

c. Bandingkan kelebihan dan kekurangan metode pengendalian kimia dan non-kimia terhadap Aedes aegypti. Jelaskan mengapa strategi pengendalian yang paling tepat bukan memilih salah satu secara tunggal, melainkan mengintegrasikan keduanya dalam kerangka Pengendalian Vektor Terpadu (*Integrated Vector Management*/*IVM*). Selanjutnya, rancang sebuah kampanye komunitas yang mempromosikan penggunaan fitokimia dari tanaman obat sebagai bagian dari pendekatan ramah lingkungan dalam pengendalian populasi *Aedes aegypti*. Uraikan langkah-langkah yang akan dilakukan serta materi kampanye yang akan digunakan

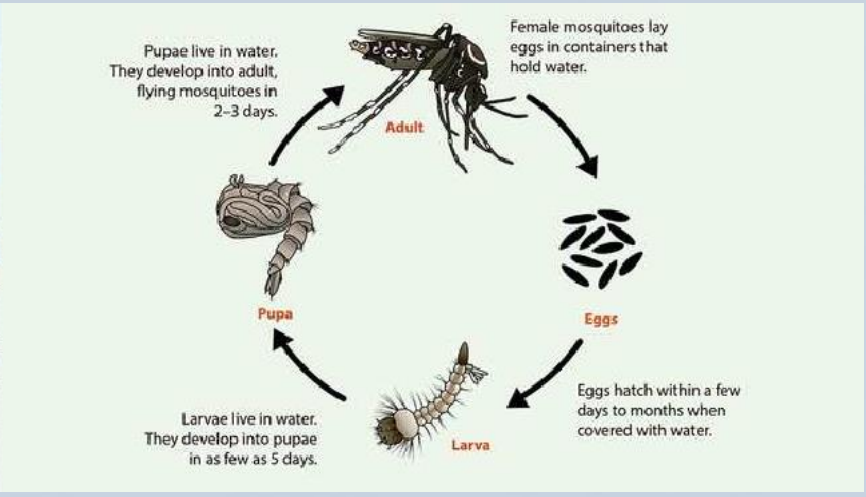
3. Otonomi Belajar

a. Tinjau artikel review dari Cahaya Mandalika Journal membahas resistensi insektisida sintetis, khususnya piretroid, pada nyamuk *Aedes aegypti* di Indonesia. Artikel ini menjelaskan bagaimana penggunaan insektisida secara terus-menerus menyebabkan resistensi nyamuk, sehingga pengendalian menjadi lebih sulit dan berdampak pada peningkatan kasus penyakit. Identifikasi pula pentingnya mempertimbangkan aspek ekologi lokal, perilaku nyamuk, dan konteks budaya dalam merancang strategi pengendalian yang efektif. Analisis bagaimana resistensi nyamuk *Aedes aegypti* terhadap insektisida sintetis seperti piretroid mempengaruhi efektivitas pengendalian vektor DBD di Indonesia. Apa konsekuensi jangka panjang dari penggunaan insektisida kimia secara berlebihan?



b. *Fogging* saja tidak cukup untuk mencegah DBD. Bagaimana upaya menjaga kebersihan lingkungan dapat menjadi solusi jangka panjang dalam memutus siklus hidup nyamuk? apa kaitannya dengan siklus hidup pada gambar?





c. Identifikasi morfologi yang terlihat dalam spesimen digital *AR*, jelaskan bagaimana perbedaan bentuk dan ciri khas nyamuk *Aedes aegypti* dengan nyamuk spesies lainnya?





d. Jelaskan bagaimana surveilans larva maupun telur (melalui ovitrap) dapat membantu dalam penanganan epidemi DBD. Keterampilan apa saja yang perlu dimiliki petugas kesehatan untuk melakukan surveilans secara efektif? Selanjutnya, rancang dan kembangkan format laporan data surveilans yang dapat digunakan untuk memantau kasus infeksi DBD terkait dengan populasi *Aedes aegypti* di lingkungan Anda. Informasi apa saja yang seharusnya dicantumkan dalam laporan tersebut?

e. Diskusikan, identifikasi dan jelaskan dampak perubahan perilaku masyarakat dapat mempengaruhi populasi *Aedes aegypti*. Apa saja tindakan yang perlu dilakukan untuk meningkatkan kesadaran dan tanggung jawab bersama? Rancang, produksi dan presentasikan video pendek yang menunjukkan langkah-langkah pencegahan yang dapat diambil oleh individu/masyarakat dalam lingkungan mereka untuk mengurangi angka kejadian penyakit yang ditularkan oleh *Aedes aegypti*

H. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,



I. GLOSARIUM

- Abdomen: Bagian paling belakang dari tubuh serangga, berisi organ pencernaan dan reproduksi.
- Antena: Sepasang alat sensor yang menonjol dari kepala serangga, digunakan untuk penciuman dan sentuhan.
- Arbovirus: Virus yang ditularkan oleh artropoda (seperti nyamuk) kepada vertebrata.
- Clypeus: Bagian depan dari kepala serangga, terletak di bawah dahi dan di atas labrum (bibir atas).
- Diurnal: Istilah untuk hewan yang aktif pada siang hari.
- Fisiologi: Studi tentang fungsi dan proses kehidupan dalam organisme.
- Imago: Tahap dewasa dari serangga yang telah menyelesaikan metamorfosisnya.
- Instar: Stadium atau tahapan pertumbuhan antara dua kali pergantian kulit (*molting*) pada larva serangga.
- Longitudinal: Memanjang atau sejajar dengan sumbu panjang suatu benda. Dalam konteks ini, garis-garis yang memanjang di tengah toraks.
- Lyre (Pola Kecapi): Pola atau bentuk menyerupai alat musik kecapi yang khas pada toraks nyamuk Aedes aegypti.
- Metamorfosis Sempurna: Proses perkembangan serangga yang melibatkan empat tahap berbeda: telur, larva, pupa, dan dewasa (imago).
- Morfologi: Studi tentang bentuk dan struktur organisme.
- Oviposisi: Proses peletakan telur oleh serangga betina.
- Palpus Maksilaris: Bagian dari mulut serangga yang menyerupai sepasang alat peraba kecil, berfungsi dalam sensasi dan penanganan makanan.
- Ritme Sirkadian (*Circadian Rhythm)*: Siklus alami proses fisik, mental, dan perilaku yang sebagian besar merespons terang dan gelap dalam periode 24 jam.
- Siphon: Struktur seperti tabung pada larva nyamuk yang digunakan untuk bernapas di permukaan air.
- Toraks: Bagian tengah tubuh serangga tempat sayap dan kaki menempel.
- Vektor: Organisme (biasanya artropoda) yang menularkan patogen dari satu inang ke inang lainnya.
- Venasi: Pola percabangan pembuluh darah pada sayap serangga.
- Vertex: Bagian puncak atau titik tertinggi pada kepala nyamuk.

Entomologi Terapan

J. REFERENSI

- Berube, D. M. (2023). Twentieth-Century Vector Control. In Pandemics and Resilience: Lessons we should have learned from Zika (pp. 339-377). Cham: Springer International Publishing.
- de Almeida, M. T., Merighi, D. G. S., Visnardi, A. B., Boneto Gonçalves, C. A., Amorim, V. M. D. F., Ferrari, A. S. D. A., ... & Guzzo, C. R. (2025). *Latin America's dengue outbreak poses a global health threat.* Viruses, 17(1), 57.
- Fontaine, A. et al. (2024). *Context-specific variation in life history traits and behavior of Aedes aegypti.* Frontiers in Insect Science.
- Freitas, R. T. de et al. (2024). *Unraveling the biological rhythm of Aedes aegypti.* Frontiers in Physiology.
- Gesto, J. S. et al. (2024). *Molecular correlates of swarming behaviour in Aedes aegypti males.* Biology Letters, Royal Society Publishing.
- Ghosh, S. K., Chakaravarthy, P., Panch, S. R., Krishnappa, P., Tiwari, S., Ojha, V. P., ... & Dash, A. P. (2011). Comparative efficacy of two poeciliid fish in indoor cement tanks against chikungunya vector Aedes aegypti in villages in Karnataka, India. BMC Public Health, 11(1), 599.
- Hannah Ritchie (2021) - <How much of the world's food production is dependent on pollinators?= Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/pollinator-dependence' [Online Resource]
- Hixson, B. et al. (2022). *A transcriptomic atlas of Aedes aegypti reveals detailed functional organization of major body parts and gut regional specializations.* eLife.
- Jaison, J., & Krishnan, J. (2024). Mosquitoes Control Strategies to Reduce the Impact of Vector-borne Diseases. In Vector Borne Diseases: Current Trends and Public Health Perspectives (pp. 1-8). Bentham Science Publishers.
- Le Coupanec, A. et al. (2021). *Brazilian Aedes aegypti as a Competent Vector for Multiple Complex Arboviral Coinfections.* Infectious Diseases Society of America.
- Martins, R. M., Espíndola, B. M., Araujo, P. P., von Wangenheim, C. G., de Carvalho Pinto, C. J., & Caminha, G. (2023). *Development of a Deep Learning Model for the Classification of Mosquito Larvae Images.* Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial

Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 14197 LNAI(October), 129–
145. https://doi.org/10.1007/978-3-031- 45392-2_9

- Okafor, I. I. (2016). Zika virus: The emerging global health challenge. Diversity and Equality in Health and Care, 13(6).
- Rao, M. R. K. (2020). Lethal efficacy of phytochemicals as sustainable sources of insecticidal formulations derived from the leaf extracts of Indian medicinal plants to control Dengue and Zika vector, Aedes aegypti (Dipetra: Culicide). International Research Journal of Environmental Sciences, 9(3), 44–54. www.isca.me
- Rochlin, I., James-Pirri, M. J., Adamowicz, S. C., Wolfe, R. J., Capotosto, P., Dempsey, M. E., ... & Ninivaggi, D. V. (2012). Integrated Marsh Management (IMM): a new perspective on mosquito control and best management practices for salt marsh restoration. Wetlands Ecology and Management, 20(3), 219-232.
- Rueda, L. M. (2020). *Pictorial keys for the identification of mosquitoes (Diptera: Culicidae) associated with Dengue Virus Transmission.* In Zootaxa (Vol. 589, Issue 1). https://doi.org/10.11646/zootaxa.589.1.1
- Stürchler, M. P. (2008). The vector and measures against mosquito bites. Travelers' Malaria. Canada: BC Decker Inc, 88-106
- World Health Organization. (2004). Global strategic framework for integrated vector management. In Global strategic framework for integrated vector management.

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB VI

"Peran Serangga dalam Dekomposisi"

Serangga : Lalat Bangkai (Sarcophaga sp)



A. PETUNJUK *E-WORKSHEET*

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "Peran Serangga dalam Dekomposisi". Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. Pretest ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet*. Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep "Peran Serangga dalam Dekomposisi".
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi *AR* yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest.* Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. PRETEST (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *pretest* singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini brtujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.



SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



Entomologi Terapan

C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Peran Serangga dalam Dekomposisi - Lalat Bangkai (*Sarcophaga sp*)

Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik dapat menyebutkan peran lalat bangkai dalam siklus materi dan pembersihan lingkungan dengan benar.
2. Peserta didik dapat menjelaskan bagaimana proses dekomposisi oleh lalat bangkai membantu daur ulang materi dalam ekosistem.
3. Peserta didik dapat menerapkan langkah-langkah praktikum <Lalat Mengurai Bangkai, Alam Menuai Nutrisi= untuk mengamati secara langsung proses dekomposisi dan peran lalat bangkai dalam mengembalikan nutrisi ke lingkungan.
4. Peserta didik dapat menganalisis keterkaitan antara aktivitas lalat bangkai dan kebersihan lingkungan.
5. Peserta didik dapat mengevaluasi peran ekologis lalat bangkai dan serangga pengurai lainnya dalam menjaga keseimbangan lingkungan.
6. Peserta didik dapat membuat poster atau infografis tentang pentingnya peran lalat bangkai dalam mengurai bangkai dan menjaga keseimbangan lingkungan.

Alat dan Bahan :

PC atau laptop atau Gawai
Jaringan Internet

- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

Metode Pembelajaran :

Simulasi
Eksplorasi

- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

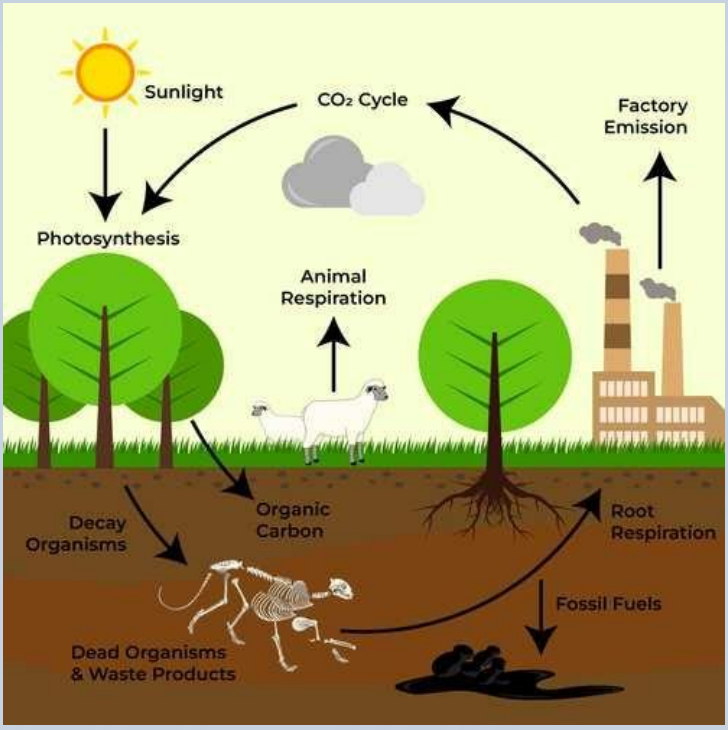
D. MATERI 1
<DEKOMPOSISI=

1. Pengertian Dekomposisi

Proses dekomposisi adalah proses penguraian bahan organik yang kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Findlay, 2021). Proses ini merupakan bagian fundamental dari siklus nutrisi di alam (daur karbon), di mana materi organik dari organisme yang mati dikembalikan ke lingkungan untuk digunakan kembali oleh organisme hidup lainnya. Dekomposisi dapat terjadi melalui beberapa tahapan, dimulai dari pemecahan fisik oleh detritivor hingga penguraian kimiawi oleh mikroorganisme. Kecepatan dekomposisi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu, kelembaban, pH, dan komposisi bahan organik itu sendiri.

Ada dua jenis dekomposisi utama, yaitu dekomposisi aerob dan dekomposisi anaerob (Liu *et al.*, 2023). Dekomposisi aerob terjadi di lingkungan yang kaya akan oksigen. Dalam kondisi ini, mikroorganisme seperti bakteri dan jamur menggunakan oksigen untuk memecah bahan organik menjadi karbon dioksida, air, dan nutrisi anorganik. Sebaliknya, dekomposisi anaerob terjadi di lingkungan tanpa kehadiran oksigen, seperti di dasar rawa, sedimen danau, atau di dalam sistem pencernaan hewan. Dalam kondisi ini, mikroorganisme anaerob, seperti bakteri metanogen, menggunakan molekul lain (seperti sulfat atau nitrat) sebagai akseptor elektron untuk memecah bahan organik. Secara umum, dekomposisi melibatkan peran kolaboratif dari berbagai organisme.

Pada tahap awal, detritivor seperti cacing tanah dan serangga mengkonsumsi dan memecah bahan organik menjadi potongan-potongan yang lebih kecil, sehingga meningkatkan luas permukaan untuk serangan mikroba. Setelah itu, mikroorganisme seperti bakteri dan jamur mengambil alih dengan mengeluarkan enzim ekstraseluler untuk memecah senyawa kompleks seperti selulosa, lignin, dan protein menjadi molekul yang lebih sederhana. Akhirnya, nutrisi anorganik yang dihasilkan, seperti nitrat dan fosfat, dapat diserap kembali oleh tumbuhan, melengkapi siklus materi dan energi di dalam ekosistem.



Dekomposisi dalam SIklus Nutrisi (Daur Karbon)
(Sumber : Geekforgeek)

Proses dekomposisi ini memegang peranan penting dalam siklus karbon, seperti yang diilustrasikan pada gambar. Ketika organisme mati dan menghasilkan produk limbah, dekomposer seperti bakteri dan jamur ("*Decay Organisms*") menguraikannya menjadi materi organik ("*Organic Carbon*") dan melepaskan karbon dioksida (CO2) ke atmosfer melalui proses respirasi dekomposer, yang kemudian masuk ke dalam "CO2 Cycle". Siklus ini menunjukkan bagaimana karbon bergerak melalui berbagai komponen ekosistem, termasuk fotosintesis oleh tumbuhan, respirasi hewan dan tumbuhan, emisi dari aktivitas industri ("Factory Emission"), serta penyimpanan karbon dalam bentuk bahan bakar fosil ("Fossil Fuels"). Dekomposisi memastikan bahwa karbon yang tersimpan dalam biomassa organisme yang mati dapat didaur ulang dan tersedia kembali bagi organisme hidup lainnya, sehingga menjaga keseimbangan siklus biogeokimia.

Serangga memainkan peran krusial dalam dekomposisi sebagai detritivor dan predator. Pada bangkai hewan, misalnya, serangga nekrofagus seperti lalat (ordo Diptera) adalah pionir yang datang. Mereka meletakkan telur pada bangkai dan larvanya (belatung) akan memakan jaringan lunak, secara signifikan mempercepat proses penguraian. Serangga lain seperti kumbang bangkai (ordo Coleoptera) akan datang kemudian, baik sebagai pemakan bangkai (nekrofagus) maupun sebagai predator yang memangsa larva lalat.

Peran serangga ini tidak hanya mempercepat penguraian, tetapi juga menjadi indikator penting dalam entomologi forensik untuk memperkirakan waktu kematian berdasarkan tahapan kolonisasi serangga pada jasad. Dengan demikian, serangga berfungsi sebagai agen biologis yang efisien dalam mengembalikan nutrisi ke ekosistem.

E. MATERI 2
<LALAT BANGKAI=

1. Klasifikasi Lalat Bangkai

Lalat daging (*Sarcophaga sp*) merupakan serangga dari famili Sarcophagidae yang dikenal memiliki peran penting sebagai dekomposer dalam ekosistem. Sebagai dekomposer, lalat daging berkontribusi pada proses penguraian bahan organik, khususnya jaringan hewan yang mati, sehingga membantu siklus nutrisi dan menjaga keseimbangan lingkungan.



Lalat Bangkai *Sarcophaga sp*

(Sumber : Wikipedia)

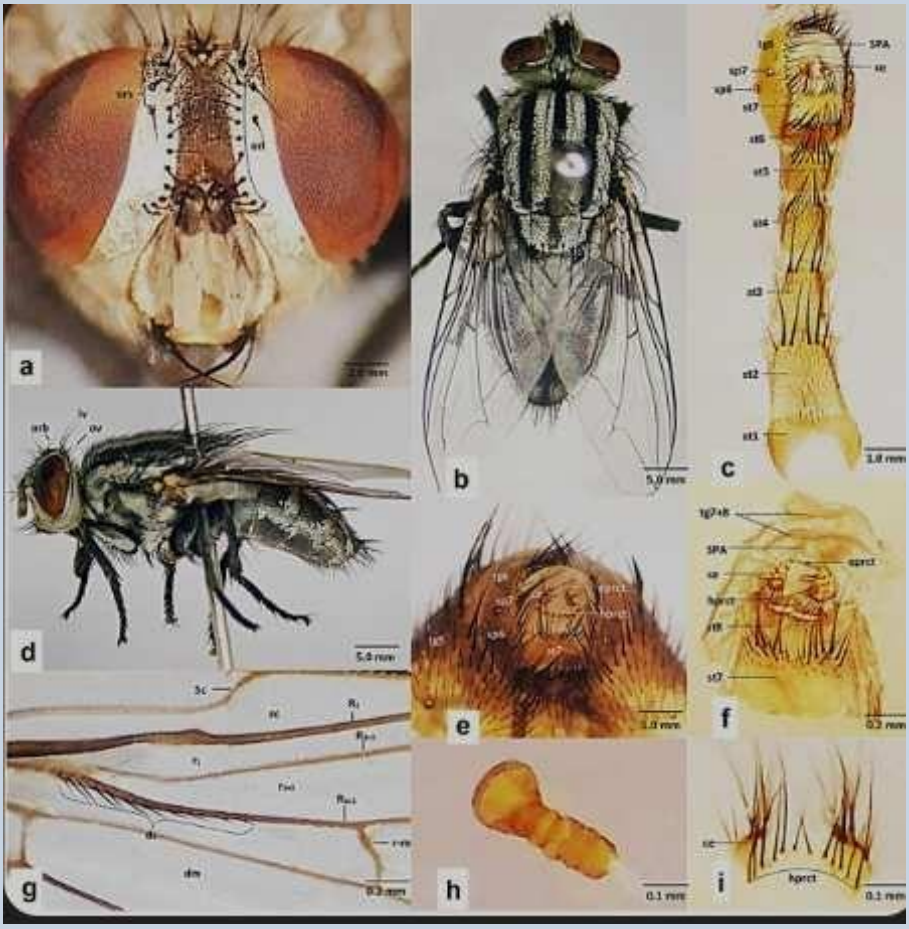
Klasifikasi lalat aging (*Sarcophaga sp*) oleh Borror et al., (2005) Sebagai berikut :

Kingdom : Animalia
Phylum : Arthropoda
Class : Insecta
Ordo : Diptera
Famili : Sarcophagidae
Genus : Sarcophaga
Spesies : Sarcophaga sp.

2. Morfologi

Sarcophaga sp mempunyai ciri-ciri antara lain ukurannya 11 mm-15 mm, berwarna abu abu. Pada toraks bagian dorsal terdapat 3 garis *longitudinal*, pada ujung abdomen terdapat rambut yang lebih panjang dari rambut sekitar abdomen, serta ujung abdomen berwarna kemerahan dan pada bagian perutnya mempunyai corak seperti papan catur. Hal ini sesuai dengan penelitian Sukmawati (2019) dan Fadhila (2022) yang menyebutkan ciri lalat Sarcophaga sp memiliki karakter warna pada badannya abu-abu dengan corak hitam. Ukuran lalat sekitar 14 mm, terdapat tiga garis hitam longitudinal pada toraks dan pada abdomen terdapat corak seperti papan catur.

Entomologi Terapan



Morfologi Lalat Daging (Sarcophaga sp)
(Sumber : Kumar *et al.*, 2023))

Berdasarkan gambar struktur morfologi lalat daging (*Sarcophaga*) di samping. Pada pandangan frontal (Gambar a), kepala lalat didominasi oleh sepasang mata majemuk yang besar, yang merupakan ciri khas lalat. Di bagian bawah kepala, terdapat proboscis atau alat isap yang digunakan untuk mengonsumsi makanan cair. Pandangan dorsal (Gambar b) memperlihatkan toraks lalat yang khas dengan pola garis-garis membujur berwarna hitam yang mencolok. Sayapnya terlihat transparan dengan venasi yang jelas, yang sering kali menjadi kunci dalam identifikasi taksonomi.

Dari pandangan lateral (Gambar d), tubuh lalat terlihat ramping dengan abdomen (perut) yang memiliki pola berbintik-bintik atau checkerboard pattern. Selain itu, gambar juga menampilkan berbagai struktur yang didissect untuk pengamatan mikroskopis. Gambar c dan f secara detail memperlihatkan bagian-bagian mulut dan proboscis. Sementara itu, gambar g menunjukkan venasi sayap yang kompleks. Gambar h menampilkan struktur antena lalat, dan gambar i memperlihatkan struktur genital lalat jantan. Secara keseluruhan, gambar-gambar ini memberikan pandangan komprehensif tentang morfologi eksternal dan internal lalat *Sarcophaga*.

3. Habitat Lalat Bangkai

Lalat menyukai tempat yang kotor dan basah seperti, kotoran hewan, sampah makanan, kotoran organik, dan air kotor (Sucipto, 2011). Habitat lalat dapat ditemukan di air, pasir, tumbuhan, dibawah kulit kayu, batu, dan ranting. Tempat pembuangan sampah menjadi salah satu tempat dimana lalat banyak ditemukan, hal ini berkaitan dengan insting dan bionomik lalat untuk meletakkan telur telurnya yang kemudian berubah menjadi larva.

Secara ilmiah, preferensi habitat lalat bangkai (*Calliphoridae* dan *Sarcophagidae*) didasari oleh kebutuhan biologis untuk memastikan kelangsungan hidup keturunannya. Lalat betina, yang memiliki insting bionomik kuat, akan mencari substrat dekomposisi yang kaya protein sebagai media tempat larva mereka berkembang. Kondisi basah dan lembap sangat esensial karena larva memerlukan lingkungan yang lembap untuk bernapas dan mengonsumsi makanan secara efisien. Selain itu, kondisi mikro-lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan pH pada *substrat* membusuk secara langsung memengaruhi laju pertumbuhan larva dan keberhasilan metamorfosis. Oleh karena itu, pemilihan habitat oleh lalat bangkai merupakan strategi bertahan hidup yang sangat penting, yang menjadikan mereka agen dekomposisi vital dalam ekosistem dan indikator penting dalam entomologi forensik.

4. Peran Ekologis Lalat Bangkai

a. Dekomposer

Lalat bangkai memiliki peran penting sebagai dekomposer. Larva lalat memakan bangkai hewan dan bahan organik yang membusuk, membantu menguraikan bahan tersebut menjadi bentuk yang lebih sederhana dan dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme lain serta tanaman.

b. Forensik

Dalam ilmu entomologi forensik, perkembangan larva *Sarcophaga* sp digunakan untuk memperkirakan waktu kematian korban dalam kasus-kasus pembunuhan, karena tahapan hidup larva dapat dikaitkan dengan durasi kematian.

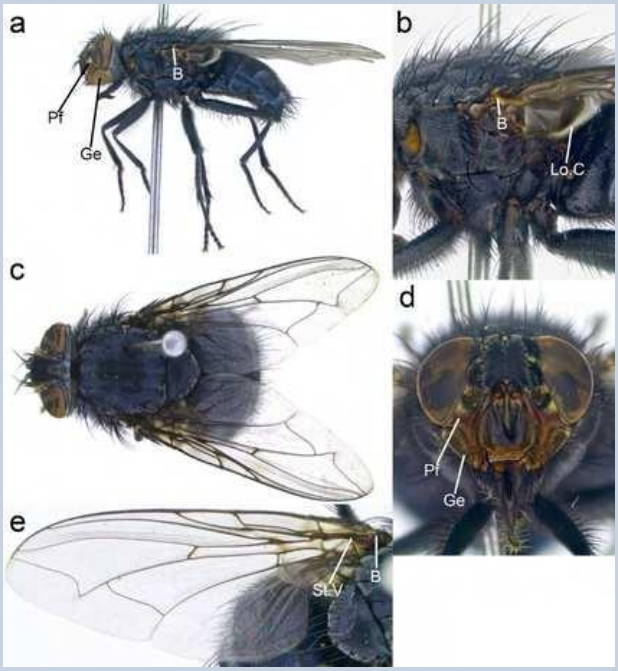
c. Vektor Penyakit

Meski berperan penting dalam ekosistem, lalat bangkai juga dapat menjadi vektor penyakit seperti diare karena mereka sering hinggap di bahan kotor dan dapat membawa bakteri patogen

5. Proses Dekomposisi

a. Pencarian Bangkai

Tahap awal dekomposisi, yang dikenal sebagai fase segar (*initial decay)*, dimulai segera setelah kematian organisme. Pada fase ini, integritas fisik bangkai masih relatif utuh. *Entomofauna* pertama yang merespons adalah lalat dewasa dari famili *Calliphoridae* (lalat hijau dan lalat biru) dan *Sarcophagidae* (lalat daging). Spesies seperti *Calliphora vicina*, *Chrysomya megacephala*, dan *Sarcophaga carnaria* memiliki kemoreseptor yang sangat sensitif terhadap senyawa volatil spesifik yang dilepaskan dari jaringan yang baru mati, seperti putresin dan kadaverin. Lalat-lalat ini tertarik ke bangkai sebagai lokasi potensial untuk *oviposisi* atau *larviposisi*, karena bangkai akan menjadi sumber nutrisi esensial bagi keturunan mereka. Proses pencarian ini dapat berlangsung dari beberapa menit hingga beberapa jam setelah kematian, tergantung pada jarak dan konsentrasi senyawa volatil yang dilepaskan.



Calliphora vicina
(Sumber: Stadler, 2022)



Sarcophaga carnaria
(Sumber: Wikipedia)



Chrysomya megacephala
(Sumber: Wikipedia)

b. Penempatan Telur atau Larva

Setelah menemukan bangkai yang sesuai, lalat betina akan memulai oviposisi (peletakan telur) atau larviposisi (pelepasan larva). Telur-telur diletakkan secara strategis di sekitar lubang alami tubuh (misalnya, lubang hidung, mulut, mata) atau pada luka terbuka yang memungkinkan akses mudah bagi larva ke jaringan lunak. Beberapa spesies, seperti lalat dari famili *Sarcophagidae*, menunjukkan perilaku *ovovivipar*, yaitu melepaskan larva hidup secara langsung ke bangkai. Penempatan telur atau larva ini sangat penting karena memastikan bahwa belatung yang baru menetas memiliki akses langsung ke sumber makanan mereka. Proses ini umumnya terjadi dalam 30 menit hingga beberapa jam setelah bangkai ditemukan, menandai transisi ke fase awal pembusukan.



Telur Lalat Bangkai
(Sumber: Fumida)

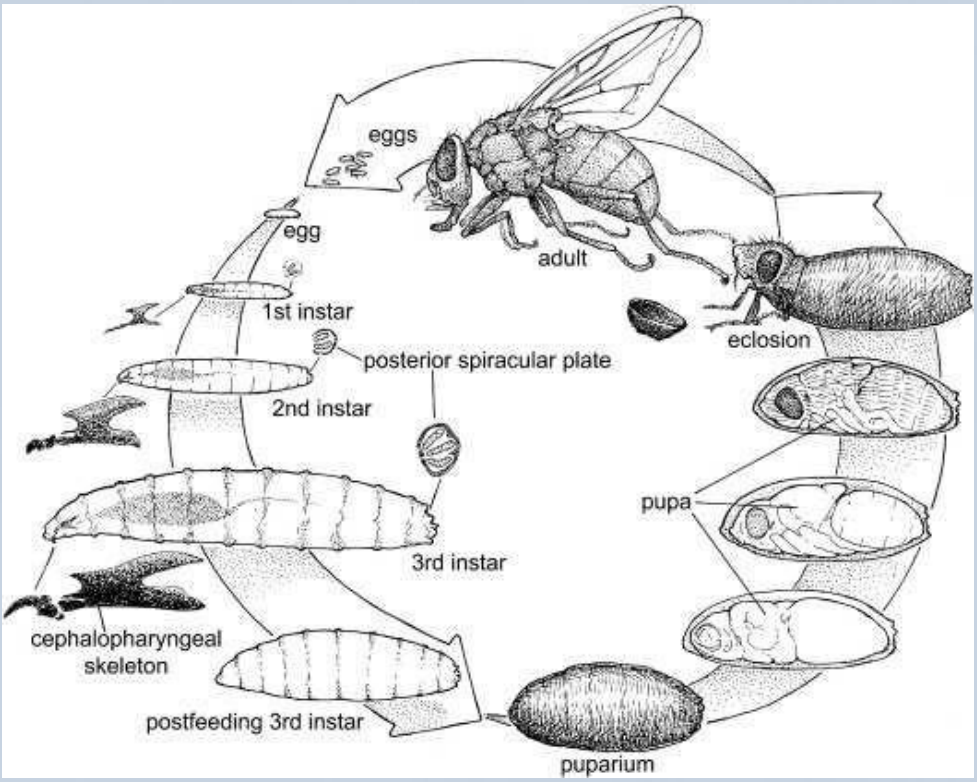


Larva Lalat Bangkai
(Sumber: Shutterstock)

c) Penetasan Larva dan Makan Jaringan.

Setelah periode inkubasi yang singkat, telur akan menetas menjadi larva instar pertama. Tahap ini menandai dimulainya fase pembusukan kembung (*bloated decay*) dan berlanjut ke fase pembusukan aktif (*active decay*). Larva, yang dikenal sebagai belatung, segera mulai mengonsumsi jaringan lunak bangkai. Mereka secara eksternal mengeluarkan enzim proteolitik dan lipolitik yang membantu memecah protein dan lemak menjadi molekul yang lebih kecil,

yang kemudian dapat diasup. Aktivitas makan massal oleh ribuan belatung menghasilkan panas metabolik yang signifikan, mempercepat laju dekomposisi dan likuifikasi jaringan. Selain lalat, kumbang predator seperti *Staphylinidae* (kumbang rove) dan *Histeridae* (kumbang kadal) mulai berkoloni di bangkai, memangsa belatung atau serangga lain. Fase intensif ini dapat berlangsung dari beberapa jam hingga 2-3 hari.



Siklus Hidup Lalat Bangkai dalam Dekomposisi
(Sumber: Mullen & Durden, 2009)

d. Pertumbuhan Larva

Fase pembusukan aktif (*active decay*) dicirikan oleh pertumbuhan larva yang pesat melalui beberapa instar (umumnya tiga pada lalat). Konsumsi jaringan organik yang masif oleh biomassa belatung menyebabkan hilangnya massa bangkai yang signifikan dan merembesnya cairan tubuh ke lingkungan sekitar. Pada tahap ini, bau busuk menjadi sangat dominan karena pelepasan gas-gas seperti putresin dan kadaverin yang merupakan hasil dari dekomposisi protein.

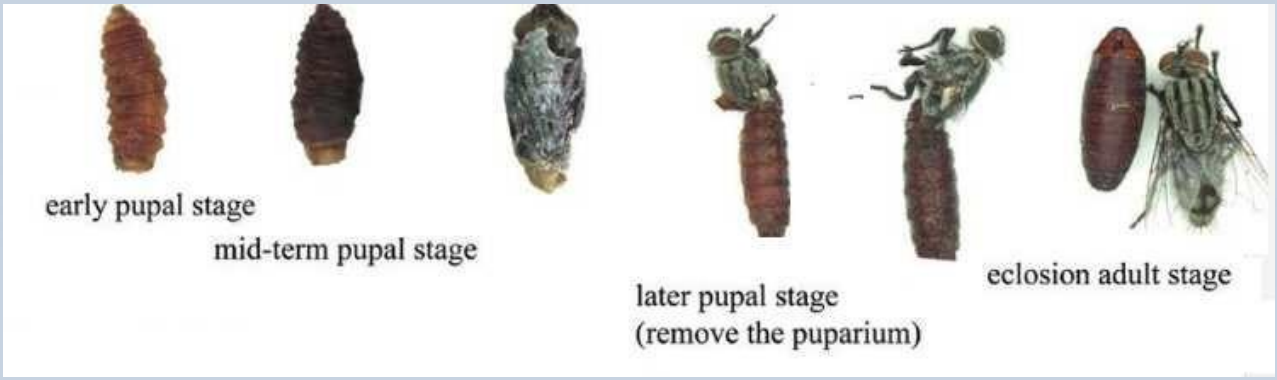
Selain lalat *Calliphoridae* dan *Sarcophagidae*, larva dari famili *Muscidae* (lalat rumah) mungkin mulai muncul. Menjelang akhir fase ini, kumbang pemakan bangkai seperti *Silphidae* (kumbang pengubur) dan *Dermestidae* (kumbang kulit) menjadi lebih aktif, mengonsumsi jaringan yang lebih kering atau sisa- sisa. Durasi fase ini bervariasi antara 4-10 hari, sangat tergantung pada faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

e. Perpindahan ke Tempat Pupa

Setelah mencapai instar terakhir dan akumulasi energi yang cukup, larva memasuki fase pra-pupa. Pada titik ini, mereka bermigrasi secara aktif menjauh dari bangkai. Perilaku migrasi ini penting untuk menemukan lokasi yang aman, kering, dan terlindung di tanah atau di bawah serasah daun, untuk memulai metamorfosis. Migrasi ini merupakan indikator penting dalam entomologi forensik karena menandakan bahwa fase makan aktif telah berakhir dan memberikan petunjuk tentang *Interval Post Mortem (PMI)*. Perpindahan ini umumnya berlangsung dalam beberapa jam hingga 1-2 hari setelah larva mencapai kematangan penuh.

f. Metamorfosis Pupa

Fase pupa berlangsung selama periode pembusukan lanjutan *(advanced decay)* dan fase kering *(dry decay)*. Larva pra-pupa akan mengalami pupasi di dalam puparium, sebuah cangkang keras pelindung yang terbentuk dari kutikula instar terakhir larva. Di dalam puparium, terjadi transformasi internal yang kompleks dari bentuk larva menjadi serangga dewasa. Pupa relatif tidak bergerak dan kurang rentan terhadap predasi dibandingkan larva aktif. Keberadaan pupa dan puparium kosong adalah bukti keberadaan lalat pada bangkai. Selain lalat, kumbang *dermestid (Dermestes maculatus)* dan spesies kumbang pemakan tulang lainnya menjadi dominan pada tahap ini, mengonsumsi sisa-sisa kering dan jaringan ikat. Durasi tahap pupa sangat bervariasi dengan suhu lingkungan, berkisar antara 1-3 minggu; suhu yang lebih tinggi mempercepat laju perkembangan.



Metamorfosis Pupa Lalat Bangkai

(Sumber: Feng *et al.*, 2023)

g. Kelahiran Lalat Dewasa

Tahap akhir dekomposisi, sering disebut fase sisa/kering *(dry decay)*, ditandai dengan keberadaan sisa-sisa seperti tulang, rambut, dan fragmen jaringan kering. Pada fase ini, lalat dewasa yang telah menyelesaikan metamorfosisnya akan muncul dari puparium. Lalat dewasa ini siap untuk memulai siklus hidup baru, yaitu mencari sumber makanan (nektar, cairan manis) dan pasangan untuk bereproduksi, serta mencari bangkai baru untuk oviposisi. Kehadiran puparium kosong dan lalat dewasa yang baru menetas berfungsi sebagai penanda penting dalam investigasi forensik. Proses penetasan lalat dewasa berlangsung terus-menerus selama periode pupa matang, dengan lalat dewasa muncul dalam beberapa jam setelah metamorfosis mereka selesai.

F. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……...……

Kelompok : ……..……

Jawablah pertanyaan dibawah ini dengan seksama dan uraikan dalam format doc/pdf.

1. Orientasi Masalah

Misteri di Padang Rumput



Seorang ahli entomologi forensik senior, Dr. Budi, tiba di lokasi penemuan. Tugasnya kali ini adalah membantu tim kepolisian memperkirakan waktu kematian dari jasad seekor hewan kecil yang ditemukan di padang rumput terbuka. Begitu sampai, ia tidak hanya memeriksa jasad, tetapi juga mencatat kondisi lingkungan.

<Suhu di sini cukup tinggi,= gumamnya sambil melihat termometer. <Sekitar 32°C. Matahari bersinar terik tanpa naungan pohon, dan udaranya kering.= Ia menulis catatannya dengan cermat. <Kondisi panas dan paparan sinar matahari langsung akan mempercepat aktivitas lalat dekomposer. Siklus hidup mereka akan berlangsung lebih cepat dibandingkan di tempat yang teduh dan lembap.= Ketika memeriksa jasad hewan yang mulai menunjukkan tanda-tanda dekomposisi awal, Dr. Budi melihat beberapa ekor lalat botol biru (Chrysomya sp.) beterbangan di sekitar bangkai, siap bertelur. Ia merenung, <Kelembapan rendah bisa sedikit menghambat perkembangan telur atau larva, tetapi suhu tinggi akan mendominasi prosesnya. Selain itu, ukuran jasad yang kecil berarti sumber makanan larva akan cepat habis, sehingga siklus dekomposisi akan berlangsung lebih singkat.=

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

Dr. Budi kemudian mengambil sampel larva yang ada di jasad. Dengan cermat ia mengamati ukurannya menggunakan kaca pembesar. Berdasarkan ukuran dan morfologi, ia menyimpulkan bahwa larva tersebut sudah berada pada tahap instar ketiga, tahap terakhir sebelum menjadi pupa. "Larva instar ketiga ini terlihat gemuk dan sehat," jelasnya kepada petugas di sampingnya. "Dalam kondisi suhu 32°C, siklus perkembangan dari telur hingga instar ketiga ini akan berjalan sangat cepat, kemungkinan dalam waktu kurang dari dua hari." Setelah mencatat semua data dan mengambil beberapa sampel, Dr. Budi memberikan kesimpulannya kepada tim. "Berdasarkan tahap perkembangan larva Sarcophaga instar ketiga dan kondisi lingkungan yang panas, cerah, serta kering, saya perkirakan kematian terjadi sekitar 36 hingga 48 jam yang lalu."

2. Pengalaman Konkret

a. Walaupun pengalaman Dr. Budi di lapangan tidak secara langsung melibatkan Sarcophaga, spesies ini tetap dapat dijadikan contoh dalam pembelajaran. Bagaimana jika spesimen digital *AR* larva Sarcophaga instar ketiga pada suhu 32 °C (seperti kondisi yang diamati Dr. Budi) divisualisasikan dan dibandingkan dengan laju pertumbuhan serta morfologi larva yang disimulasikan pada suhu berbeda (misalnya 25 °C atau 20 °C)? Eksperimen virtual semacam ini dapat diakses melalui lingkungan *AR* dengan memindai barcode berikut





3. Observasi Reflektif

a. Dengan mengamati perkembangan larva Sarcophaga pada spesimen digital *AR* di berbagai simulasi suhu, pola apa yang muncul terkait durasi setiap tahap instar, dan bagaimana pola ini mendukung atau menyimpang dari kesimpulan Dr. Budi mengenai percepatan perkembangan pada 32∘C?

4. Konseptualisasi Abstrak

a. Berdasarkan data yang diperoleh dari simulasi perkembangan spesimen digital *AR Sarcophaga* pada berbagai kondisi lingkungan (suhu, kelembaban, ukuran bangkai), model matematis atau konsep biologi apa (misalnya, *Accumulated Degree Hours/Days*) yang dapat dirumuskan untuk memprediksi waktu kematian dengan lebih akurat?

5. Eksperimen Aktif

a. Jika kita memanipulasi faktor lingkungan (misalnya, kelembaban rendah dan ukuran bangkai kecil) pada simulasi spesimen digital *AR* Sarcophaga dengan mempertahankan suhu 32∘C, bagaimana perubahan ini mempengaruhi laju perkembangan larva dibandingkan dengan skenario Dr. Budi, dan bagaimana hal ini mengubah perkiraan *PMI* (*Post Mortem Interval*)?

6. Generalisasi

a. Bagaimana spesimen digital *AR* lalat *Sarcophaga* dapat membantu siswa memahami hubungan antara lingkungan (seperti suhu atau kelembaban) dan siklus hidup serangga, serta mengapa pengetahuan ini penting dalam memperkirakan waktu kejadian suatu peristiwa di alam?

G. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,



H. GLOSARIUM

- Abdomen: Bagian belakang tubuh serangga, berisi organ pencernaan dan reproduksi.
- Bionomik: Studi tentang hubungan suatu organisme dengan lingkungannya.
- Dekomposer: Organisme yang menguraikan bahan organik mati menjadi zat yang lebih sederhana, mengembalikan nutrisi ke lingkungan.
- Dorsal: Bagian punggung atau atas dari tubuh serangga.
- Ekosistem: Komunitas organisme hidup yang berinteraksi satu sama lain dan dengan lingkungan non-hidup mereka.
- Enzim: Protein yang mempercepat reaksi kimia dalam organisme hidup.
- Famili: Kategori taksonomi di atas genus dan di bawah ordo, mengelompokkan organisme yang berkerabat dekat.
- Forensik (Ilmu Forensik): Aplikasi prinsip dan metode ilmiah untuk memecahkan masalah hukum, seringkali terkait dengan penyelidikan kriminal.
- Holometabola: Istilah untuk serangga yang mengalami metamorfosis lengkap, dengan empat tahap siklus hidup (telur, larva, pupa, dewasa).
- Insting: Pola perilaku bawaan atau alami yang tidak dipelajari.
- Jaringan Hewan: Kumpulan sel-sel yang serupa yang bekerja bersama untuk melakukan fungsi tertentu dalam tubuh hewan.
- Larva (Belatung): Tahap awal perkembangan serangga yang mengalami metamorfosis lengkap, biasanya berbentuk seperti ulat.
- Longitudinal: Memanjang atau sejajar dengan sumbu panjang suatu benda.
- Metamorfosis: Proses perubahan bentuk dan struktur yang dialami serangga selama perkembangannya dari telur hingga dewasa.
- Nutrisi: Zat yang diperlukan organisme untuk pertumbuhan, metabolisme, dan fungsi lainnya.
- Organik (Bahan Organik): Bahan yang berasal dari makhluk hidup atau sisa-sisa makhluk hidup.
- Ovovivipar: Metode reproduksi di mana telur menetas di dalam tubuh induk, dan larva dikeluarkan langsung daripada telur.
- Pupa: Tahap istirahat atau transisi dalam metamorfosis serangga lengkap, di mana larva berubah menjadi dewasa.

Entomologi Terapan

I. REFERENSI

- Borror, D. J., Triplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (2005). *An Introduction to the Study of Insects*. Cengage Learning.
- Fadhila, A. N., Sutiningsih, D., & Martini, M. (2022). *Keragaman Jenis Lalat Dan Ektoparasit (Jamur) Pada Kaki Lalat Di Pasar Peterongan Kota Semarang.* Jurnal Kesehatan Masyarakat (Undip), 10(1), 1–5. https://doi.org/10.14710/jkm.v10i1.30910
- Findlay, S. E. (2021). *Organic matter decomposition. In Fundamentals of ecosystem science* (pp. 81-102). Academic Press.
- Kumar, R., Bala, M., & Al Galil, F. M. A. (2023). *Morphological description of a new species of Genus Sarcophaga s. lat.*(Diptera: Sarcophagidae) from Jammu and Kashmir, India. International Journal of Tropical Insect Science, 43(5), 1659-1668.
- Liu, Y., Zhang, Y., Wang, M., Wang, L., Zheng, W., Zeng, Q., & Wang, K. (2023). *Comparison of the basic processes of aerobic, anaerobic, and aerobic-anaerobic coupling composting of Chinese medicinal herbal residues.* Bioresource Technology, 379, 128996.
- Mullen, G. R., & Durden, L. A. (Eds.). (2009). *Medical and veterinary entomology.* Academic press.
- Stadler, F., Johnston, N. P., Butterworth, N. J., & Wallman, J. F. (2022). *13. Fly Colony Establishment, Quality Control and Improvement.* A COMPLETE GUIDE TO MAGGOT THERAPY, 257.
- Sucipto.D (2011) *Vektor Penyakit Tropis*. Yogyakarta: Gosyen Publishing.
- Sukmawati, N. L., Ginandjar, P., & Hestiningish, R. (2019). *Keanekaragaman Spesies Lalat Dan Jenis Bakteri Kontaminan Yang Dibawa Lalat Di Rumah Pemotongan Unggas (RPU) Semarang Tahun 2018.* Jurnal Kesehatan Masyarakat, 1, 252–259. http ://ejournal3.undip .ac.id/index.php /jkm

Entomologi Terapan

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB VII

"Serangga yang Menghasilkan Bahan Bernilai Ekonomi"

Serangga : Ulat Sutra (Bombyx mori)



A. PETUNJUK E WORKSHEET

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "Serangga yang Menghasilkan Bahan Bernilai Ekonomi". Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. Pretest ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet*. Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep "Serangga yang Menghasilkan Bahan Bernilai Ekonomi".
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi AR yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest*. Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. *PRETEST (INDIVIDUAL)*

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *pretest* singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini brtujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.



SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Serangga yang Menghasilkan Bahan Bernilai Ekonomi (Ulat Sutera - *Bombyx mori*).

Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu mengidentifikasi tahapan dalam proses pembuatan sutra dari ulat sutra (*Bombyx mori)*.
2. Peserta didik mampu memahami prinsip dasar (morfologi, anatomi, dan fisiologi), serta mengenali peranan serangga yang menghasilkan bernilai ekonomi dalam kehidupan manusia.
3. Peserta didik mampu menerapkan pengetahuan dasar entomologi untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi ekonomi dari berbagai jenis serangga.
4. Peserta didik mampu menganalisis keterkaitan antara struktur tubuh dan ekologi serangga dengan kemampuannya menghasilkan produk ekonomi.
5. Peserta didik mampu membandingkan potensi ekonomi dari serangga penghasil bahan bernilai ekonomi lainnya dengan ulat sutra..
6. Peserta didik mampu merancang solusi dan inovasi pemanfaatan serangga bernilai ekonomi secara berkelanjutan dalam mendukung kesejahteraan masyarakat dan konservasi lingkungan.

Alat dan Bahan :

PC atau laptop atau Gawai

- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

Metode Pembelajaran :

Simulasi

- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. PENDAHULUAN

Selamat datang di dunia entomologi ekonomi

E-worksheet ini di rancang untung menuntun peserta didik dalam pembelajaran mandiri yang kritis dan ilmiah untuk memahami peran serangga sebagai penghasil bahan bernilai ekonomis. *E-worksheet* ini tidak hanya menyajikan informasi tentang morfologi, metamorfosis, dan pengolahan kokon menjadi benang sutra bernilai ekonomis, tetapi juga mendorong peserta didik untuk mengembangkan literasi sains dan berpikir kritis untuk menganalisis masalah-masalah entomologi ekonomi yang kompleks serta menemukan solusi mempromosikan benang sutra ke berbagai sektor perekonomian.



Klasifikasi Ulat Sutera

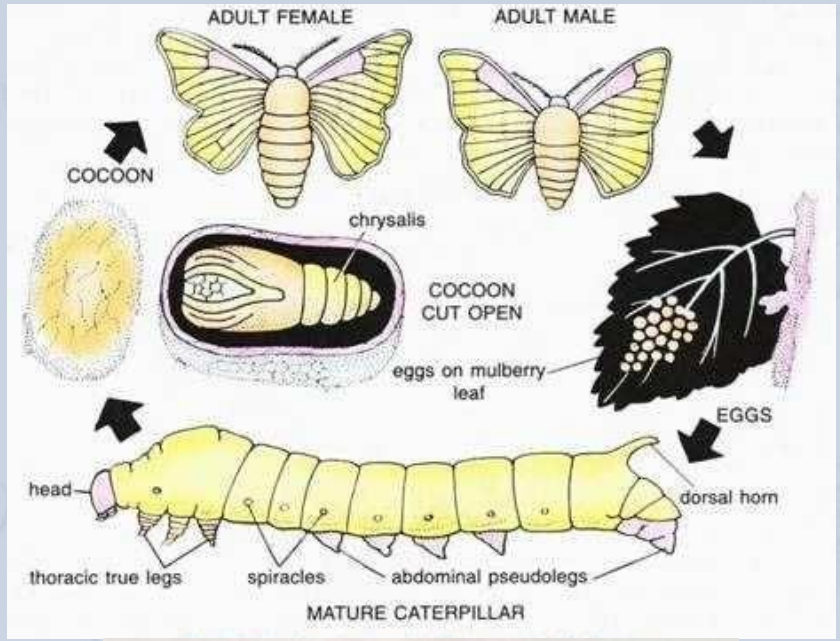
Domain	*: Eukaryota*
Kingdom	*: Animalia*
Phylum	*: Arthropoda*
Class	*: Insecta*
Order	*: Lepidoptera*
Family	*: Bombycidae*
Genus	*: Bombyx*
Spesies	*: B. Mori*

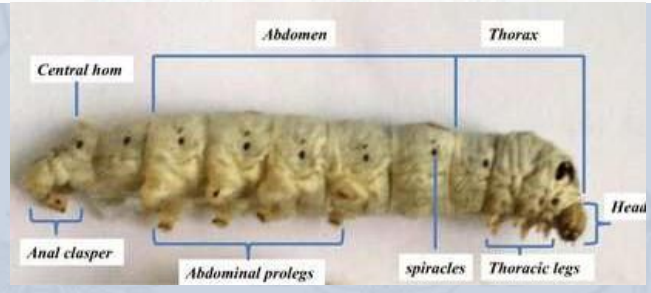
Bombyx mori, yang secara awam dikenal sebagai ulat sutera domestik, merepresentasikan spesies ngengat dengan signifikansi ekonomi fundamental dalam produksi serat sutera. Berbeda dengan taksa kerabat liarnya, Bomby*x mori* telah melalui proses domestikasi ekstensif selama milenia melalui praktik serikultur (budidaya sutera), yang berakar dari peradaban Tiongkok kuno. Domestikasi ini secara inheren telah mengeliminasi kapasitas terbang dan keberlangsungan hidup mandiri di habitat alami, menjadikan spesies ini sepenuhnya bergantung pada intervensi manusia untuk siklus hidupnya. Spesies ini merupakan pondasi industri sutera global bernilai miliaran dolar, dengan jejak ekologis yang lebih rendah dibandingkan serat sintetis, serta terus dikembangkan untuk aplikasi biomedis dan material canggih. Permintaan global terhadap sutera pada tahun 2024 mencapai nilai pasar sekitar USD 20.99 miliar, dan diperkirakan akan terus meningkat. Per Juli 2025, harga sutera mentah (*raw silk*) di pasar global bervariasi tergantung grade, mulai dari sekitar Rp 334.536 hingga lebih dari Rp 1.600.000 per kilogram.

Entomologi Terapan

E. MATERI

1. Morfologi Ulat Sutra



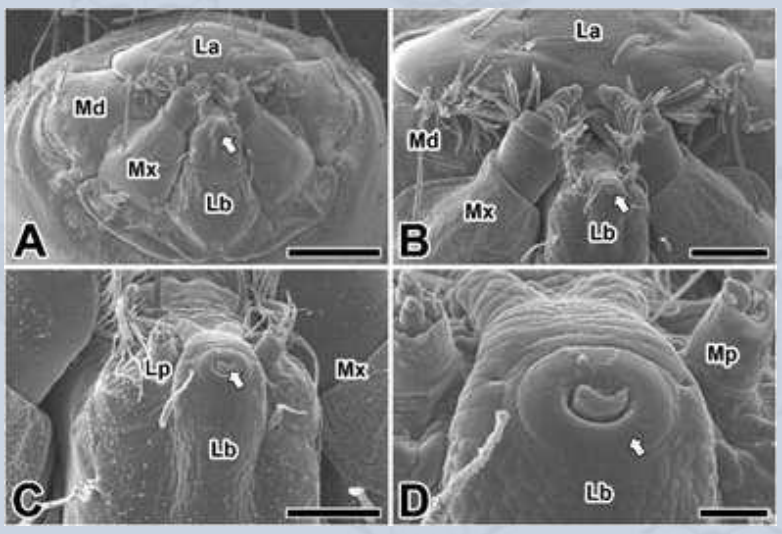


Struktur Tubuh Ulat Sutera
(Sumber: dacollege; Abdeli et al., 2018)

Gambar yang disajikan memperlihatkan morfologi eksternal larva *Bombyx mori*, yang umum dikenal sebagai ulat sutra, dengan pembagian segmen tubuh dan penunjukan struktur-struktur kunci. Struktur tubuh larva *Bombyx mori* terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu Caput (Kepala), Toraks (Dada), dan Abdomen (Perut), yang secara kolektif beradaptasi untuk fungsi makan dan pertumbuhan masif (Abdelli et al., 2018). Morfologi *Bombyx mori* menunjukkan adaptasi yang spesifik pada setiap tahap siklus hidup *holometabola*, yang secara komprehensif diilustrasikan pada Gambar 1 (siklus hidup dan anatomi larva) dan Gambar 2 (struktur kepala larva). Pada fase larva, ulat *Bombyx mori* memiliki tubuh silindris tersegmentasi, yang ditopang oleh tungkai sejati *toraks* dan *pseudolegs abdominal* untuk *lokomosi* dan perlekatan. Sistem pernapasan diwakili oleh spirakel, dan ciri khas dorsal horn terletak di posterior tubuh.

a. Kepala

Bagian kepala (caput) larva *Bombyx mori* merupakan kapsul kepala termineralisasi kuat yang terletak di anterior tubuh, berfungsi sebagai pusat asupan nutrisi dan organ sensori vital. Struktur mulutnya sangat teradaptasi untuk konsumsi daun murbei, meliputi labrum (La) sebagai bibir atas untuk manipulasi pakan, sepasang mandibula (Md) yang robusta sebagai rahang pengunyah utama, serta maksila (Mx) dan labium (Lb) sebagai rahang bawah dan bibir bawah yang membantu proses makan. Kedua rahang tersebut dilengkapi dengan palpus sensori: palpus maksilaris (Mp) dan palpus labial (Lp), yang berperan dalam kemoresepsi dan identifikasi pakan. Di bagian ventral kepala, terdapat spineret, sebuah organ khusus tempat keluarnya filamen sutera dari kelenjar sutera. Selain itu, meskipun tidak memiliki mata majemuk, larva dilengkapi dengan enam pasang oseli (mata tunggal) yang tersusun melingkar di setiap sisi kepala, memungkinkan persepsi cahaya, serta sepasang antena pendek bersegmen tiga yang berfungsi sebagai kemoreseptor.



Struktur Kepala Ulat Sutera
(Sumber: Kim *et al.*, 2020)

b. Dada (Thoraks)

Bagian ini terdiri dari tiga segmen yang berdekatan dengan kepala. Pada setiap segmen toraks terdapat sepasang kaki toraks (*thoracic legs*) yang bersegmen. Kaki-kaki ini beradaptasi untuk membantu pergerakan dan memegang makanan. Bagian toraks juga menunjukkan keberadaan spirakel, yaitu bukaan eksternal sistem trakea yang berfungsi untuk pertukaran gas. 13 segmen di bagian paling depan adalah kepala yang dibungkus kulit keras yang berwarna hitam kecokelatan.

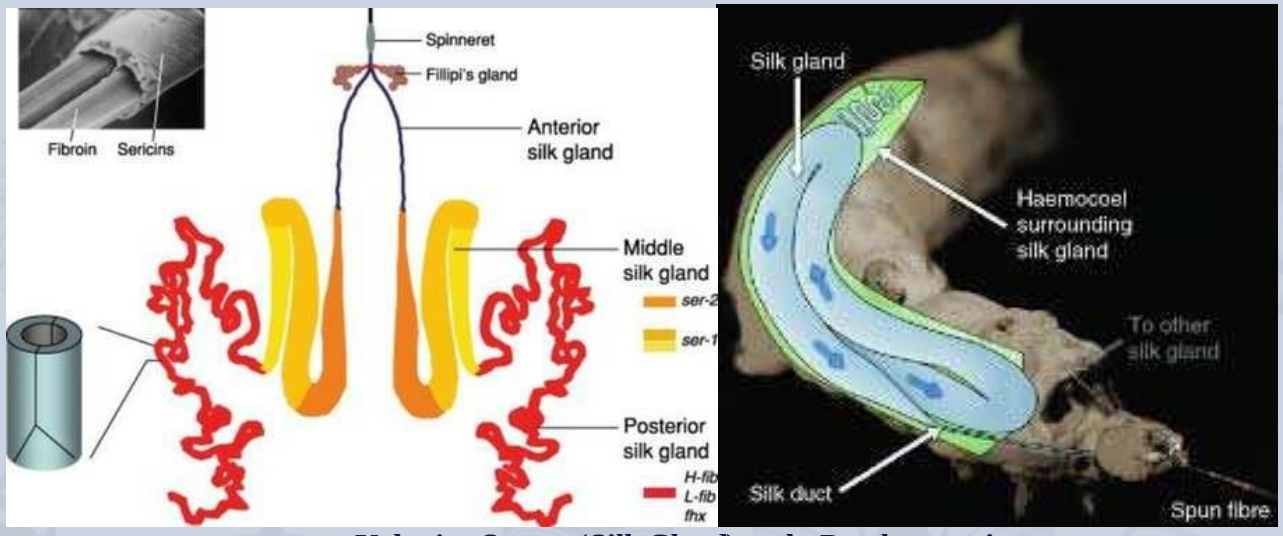
Entomologi Terapan

Tiga segmen berurutan yaitu prothoraks, *mesothoraks*, dan *metathoraks*. Segmen ke 3,4,5,6, dan terakhir masing-masing mempunyai sepasang kaki, yang disebut kaki abdomen. Kaki abdomen terakhir yang paling besar disebut kaki kaudal. Kaki abdomen tidak mempunyai segmen dan disebut *proleg*. Sedangkan tanduk yang pada segmen ke-8 disebut tanduk kaudal.

c. Abdomen

Sembilan segmen terakhir disebut abdomen. Abdomen Merupakan bagian terbesar dari tubuh larva, tersusun atas sekitar sepuluh segmen yang dapat dibedakan. Setiap segmen abdomen memiliki spirakel yang memfasilitasi respirasi. Pada segmen abdomen, khususnya segmen 3 hingga 6, terdapat pasangan *proleg* abdominal (*abdominal prolegs*). Proleg ini merupakan tonjolan berotot yang tidak bersegmen dan dilengkapi dengan cakar kecil (*crochets*) di ujungnya, berfungsi sebagai alat bantu pergerakan dan melekat pada substrat saat makan atau bergerak. Pada segmen abdomen paling posterior, terdapat anal *clasper*, yang membantu larva dalam memegang substrat dan pergerakan, serta *central hom* (tanduk sentral) yang merupakan *apendiks dorsal* khas pada segmen kedelapan abdomen dan tidak memiliki fungsi lokomotor.

Kelenjar sutera *(silk glands)* terletak memanjang di dalam tubuh larva *Bombyx mori,* membentang dari bagian toraks (dada) hingga ke sebagian besar segmen abdomen (perut). Kedua kelenjar ini (satu di setiap sisi tubuh) akan bertemu di bagian depan dan bermuara di *spineret*, yang terletak di bagian labium (bibir bawah) pada kepala larva.



Kelenjar Sutera (*Silk Gland*) pada *Bombyx mori*

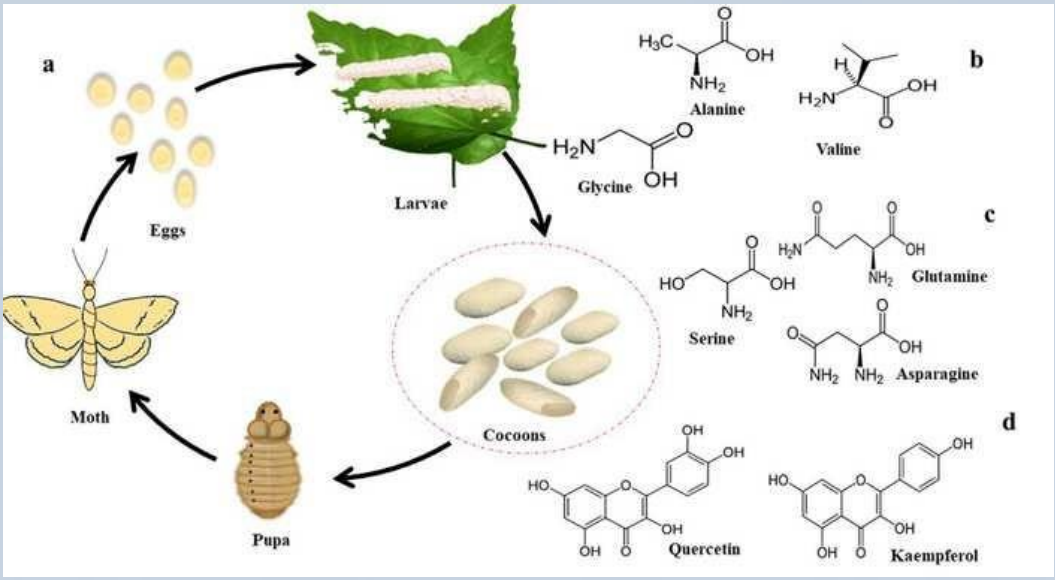
(Sumber : Dutta *et al.*, 2023; Sparkes *et al.,* 2017)

2. Pengertian Metamorfosis

Metamorfosis merujuk pada suatu proses transformasi biologis fundamental pada serangga yang melibatkan perubahan morfologi dan struktur tubuh secara signifikan *pasca-emergen* (menetas atau lahir). Transformasi ini merupakan hasil dari pertumbuhan dan diferensiasi seluler yang terkoordinasi, mengarah pada restrukturisasi menyeluruh dari bentuk juvenil hingga mencapai stadium dewasa yang matang secara reproduktif melalui serangkaian tahapan yang teratur dan spesifik. (Rolff *et al.*, 2019) Berdasarkan kompleksitas perubahan yang terjadi, metamorfosis diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama: ametabola, *hemimetabola*, dan *holometabola*.

Tipe ametabola merepresentasikan pola perkembangan paling primitif, di mana individu juvenil (*nimfa*) menunjukkan kemiripan morfologis yang substansial dengan individu dewasa (*imago*), perbedaan utama terletak pada ukuran dan kematangan organ reproduksi. Perkembangan pada tipe ini tidak melibatkan fase pupa (misalnya, *Thysanura*). Sebaliknya, hemimetabola dicirikan oleh perkembangan bertahap yang melalui stadium telur, *nimfa*, dan imago. *Nimfa* pada serangga *hemimetabola* secara progresif menyerupai imago melalui serangkaian ekdisis (pergantian kulit) tanpa transisi melalui fase pupa (misalnya, *Orthoptera*). Adapun tipe *holometabola* merupakan bentuk metamorfosis yang paling kompleks dan dianggap paling berevolusi, melibatkan empat stadium diskrit secara *morfologis* dan *ekologis*: telur, larva, pupa, dan imago. Pada tipe ini, stadium larva memiliki *morfologi*, habitat, dan kebiasaan makan yang sangat berbeda dari imago, dengan fungsi utama mengakumulasi energi dan biomassa. Setelah fase larva, individu memasuki stadium pupa, sebuah fase inaktif yang esensial untuk restrukturisasi anatomis dan fisiologis ekstensif melalui proses histolisis dan histogenesis, sebelum akhirnya bermetamorfosis menjadi imago dengan bentuk dan perilaku yang baru. Sebagai contoh, ulat sutra (Bombyx mori) merupakan representasi klasik serangga *holometabola*. Spesies ini memiliki relevansi ekonomi signifikan karena kemampuannya memproduksi benang sutra alami saat memasuki fase pupa, yaitu ketika membentuk kokon pelindung. Pemahaman komprehensif mengenai siklus hidup dan proses metamorfosis *Bombyx mori* tidak hanya krusial bagi kajian entomologi terapan, tetapi juga fundamental dalam konteks budidaya serikultur dan pengembangan ekonomi berbasis sumber daya hayati.

3. Tahapan Metamorfosis Ulat Sutera



Siklus Hidup Ulat Sutera
(Sumber: Biganeh *et al.*, 2022)

a. Telur

Siklus dimulai dengan telur (a), tahap pertama dalam siklus hidup ulat sutra yang dihasilkan oleh ngengat betina dewasa. Telur *Bombyx mori* biasanya berukuran sangat kecil (sekitar 1 mm), berwarna kekuningan saat baru dikeluarkan, lalu berubah menjadi abu-abu seiring berkembangnya embrio di dalamnya. Masa inkubasi berlangsung selama 7-10 hari, tergantung pada suhu dan kelembaban lingkungan (Wardhana dkk., 2024).

b. Larva (Ulat Sutra)

Setelah menetas, telur menghasilkan larva kecil yang dikenal sebagai instar pertama. Larva ini, yang digambarkan sedang makan daun murbei, merupakan fase aktif makan untuk mengakumulasi energi. Larva, atau yang dikenal sebagai ulat sutra, akan mengalami lima kali pergantian kulit *(molting)* atau disebut lima instar, untuk mencapai ukuran maksimalnya. Fase larva berlangsung selama 20-30 hari, bergantung pada kondisi lingkungan dan ketersediaan pakan, terutama daun murbei *(antara lain Morus alba),* yang merupakan makanan utama ulat sutra (Wardhana dkk., 2024). Pada tahap ini, larva mengalami pertumbuhan tubuh yang sangat cepat dan menyimpan cadangan energi dalam bentuk protein dan lemak. Larva akhir instar kelima akan berhenti makan dan mulai memintal serta dari kelenjar labialnya untuk membentuk kokon atau kepompong.

c. Pupa (Kokon)

Setelah kokon selesai terbentuk, ulat berada dalam fase pupa, yang merupakan masa transformasi aktif namun tersembunyi. Pada fase pupa inilah ulat sutra memproduksi benang sutra, yang tersusun dari protein *serisin* dan *fibroin*, untuk membentuk kokon. Kokon-kokon (digambarkan dalam lingkaran putus-putus merah) inilah yang kemudian dipanen untuk produksi sutra. Pada fase ini, terjadi reorganisasi total jaringan tubuh: sebagian besar struktur baru seperti sayap, antena, kaki, dan organ reproduksi mulai berkembang (Xu et al., 2021).

Fase pupa berlangsung selama 10-14 hari. Menurut penelitian terbaru, tahap pupa tidak hanya merupakan masa istirahat, tetapi juga fase kritis transformasi genetik dan hormonal, yang dikendalikan oleh hormon *ecdysone* dan *juvenile hormone*. Mutasi atau gangguan pada ekspresi gen tertentu, seperti fl(2)d, dapat menyebabkan gangguan metamorfosis atau penundaan transformasi menjadi imago (Huang et al., 2023).

d. Imago (Ngengat Dewasa)

Dari dalam kokon, pupa akan bermetamorfosis menjadi ngengat dewasa (*imago*), yang kemudian akan kawin dan bertelur lagi, mengulang siklus hidup. Imago ulat sutra memiliki tubuh bersayap, namun tidak lagi memiliki mulut fungsional dan tidak makan. Fungsi utama *imago* adalah untuk reproduksi. Setelah kawin, ngengat betina akan bertelur dan memulai siklus hidup baru. Masa hidup *imago* umumnya sangat singkat, yaitu sekitar 5-7 hari (Sivaprasad et al., 2018).



4. Mekanisme Biologis

Metamorfosis ulat sutra dikendalikan oleh interaksi kompleks hormon dan ekspresi genetik. Hormon utama yang terlibat antara lain:

a. *Ecdysone*, yang memicu molting dan diferensiasi sel.

b. *Juvenile hormone*, yang mempertahankan karakteristik larva dan menekan perkembangan dewasa.

Selama fase pupa, hormon *juvenil* menurun drastis, menunjukkan munculnya struktur *imago*. Selain itu, terjadi aktivasi gen-gen spesifik yang mendorong pembentukan jaringan dewasa dan penghancuran struktur lava yang tidak dibutuhkan.

Proses ini juga melibatkan mekanisme epigenetik, seperti modifikasi RNA dan aktivitas protein pengatur, yang masih menjadi fokus penelitian ilmiah saat ini (Huang et al., 2023).

5. Pembentukan Kokon

Ulat Sutra *(Bombyx mori)* merupakan serangga yang mengalami metamorfosis sempurna *(holometabola)* dengan empat tahap utama dalam siklus hidupnya : telur, larva, pupa dan imago. Salah satu tahapan penting dalam siklus hidup tersebut adalah proses pembentukan kokon, yaitu fase di mana larva membentuk selubung pelindung berupa benang sutra sebelum memasuki tahap pupa.

Kokon tidak hanya memiliki fungsi biologis pelindung selama transformasi ke fase dewasa, tetapi juga memiliki nilai ekonomi tinggi, karena serta yang dihasilkan dari kokon merupakan bahan dasar pembuatan kain sutra (Wu et al., 2024).

a. Proses Fisiologis Kelenjar Sutra

1). Aktivasi Kelenjar Sutra

Pembentukan kokon dimulai saat ulat sutra memasuki tahap akhir instar kelima. Pada saat ini, kelenjar labial atau kelenjar sutra di dalam tubuh ulat mengalami aktivitas maksimal. Kelenjar ini memproduksi dua jenis protein utama: *fibroin* dan *serisin*, yang kemudian dipintal menjadi benang sutra (Kiyosawa et al., 2016). *Fibroin* merupakan komponen utama benang, sedangkan serisin berfungsi sebagai lem yang merekatkan helai benang menjadi kokon padat

2). Gerakan Pemintalan

Setelah berhenti makan, larva mulai melakukan gerakan khas berupa gerakan kepala berulang-ulang membentuk angka delapan, yang disebut sebagai gerakan permintalan (*spinning*). Gerakan ini berlangsung selama 3-4 hari dan menghasilkan sutra berkilau yang mengelilingi tubuh larva, membentuk struktur kokon yang padat dan kuat (Kiyosawa et al., 2016).

b. Pengaruh Faktor Internal dan Eksternal

Menurut Offord (2016), pembentukan kokon sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan pencahayaan. Suhu yang optimal (25-28 derajat celcius) dan kelembaban relatif sekitar 65-70% sangat penting untuk menghasilkan kokon yang sempurna dalam bentuk dan kekuatan benangnya. Jika kondisi lingkungan tidak ideal kokon yang dihasilkan bisa menjadi cacat, tipis, atau tidak tertutup sempurna.

c. Variasi Bentuk dan Kualitas Kokon

1). Variasi Bentuk

Berbagai strain ulat sutra memiliki kecenderungan menghasilkan bentuk kokon yang berbeda-beda. Kiyosawa (2016), mencatat bahwa bentuk kokon bisa bervariasi antara bulat telur, lonjong, atau berbentuk kacang, tergantung pada genetika dan pola gerakan spinning yang dilakukan oleh larva. Bentuk ini mempengaruhi efisiensi permintalan dan pemrosesan benang oleh manusia.

2). Kualitas Kokon

Kualitas sutra yang dihasilkan Bombyx mori sangat bergantung pada kualitas nutrisi daun murbei (Morus spp.) yang dikonsumsi. Morus alba dikenal adaptif dengan hasil daun tinggi, M. nigra kaya asam amino yang mendukung sintesis protein sutra, sedangkan M. indica tahan kering dengan produksi daun melimpah. Selain itu, hibrida seperti S1635 (M. alba × M. indica) memberikan keseimbangan terbaik antara hasil daun, kandungan nutrisi, dan ketahanan hama, sehingga meningkatkan hasil kokon dan kualitas serat sutra (Ghosh et al., 2021).

c. Signifikasi kokon bagi Ulat dan Manusia

1) . Fungsi Biologis

Secara biologi, kokon berfungsi sebagai struktur pelindung selama tahap pupa. Di dalam kokon, larva berhenti bergerak dan memulai proses reorganisasi jaringan tubuh, dari bentuk ulat menjadi ngengat dewasa. Kokon juga menjaga suhu tubuh dan mencegah serangan predator atau

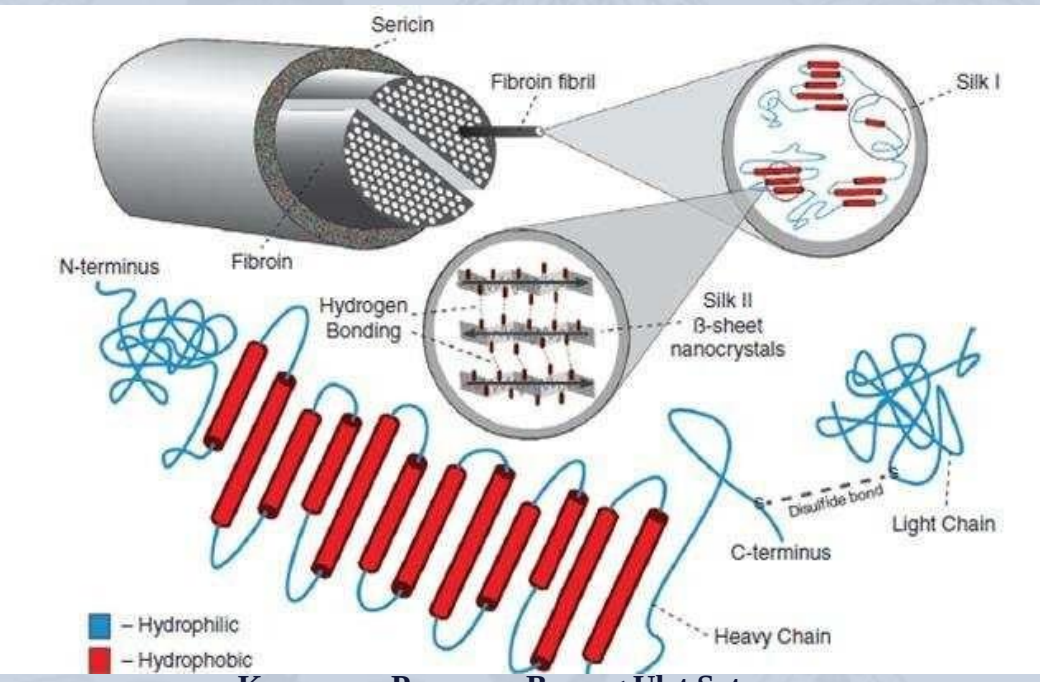
mikroorganisme selama proses tersebut (Prijono dkk., 2025).

2). Fungsi Ekonomi

Dari sudut pandang manusia, kokon merupakan sumber utama benang sutra alami. Serat yang dihasilkan dari kokon memiliki kekuatan tarik tinggi, elastisitas yang baik, dan kilau alami yang tidak dimiliki oleh serat sintesis. Oleh karena itu, kokon memiliki nilai ekonomi tinggi, terutama industri tekstil dan kerajinan (Andadari dkk., 2015).

6. Struktur Benang Ulat Sutera

Benang sutera, produk dari larva ngengat *Bombyx mori*, adalah biopolimer yang kompleks dan terstruktur, memberikan kombinasi sifat mekanik unggul dan estetika yang khas. Struktur filamen sutera ini secara fundamental terdiri dari dua komponen protein utama: fibroin dan serisin, sebagaimana diilustrasikan pada gambar berikut.



Komponen Penyusun Benang Ulat Sutera
(Sumber: Temesgen *et al.*, 2024)

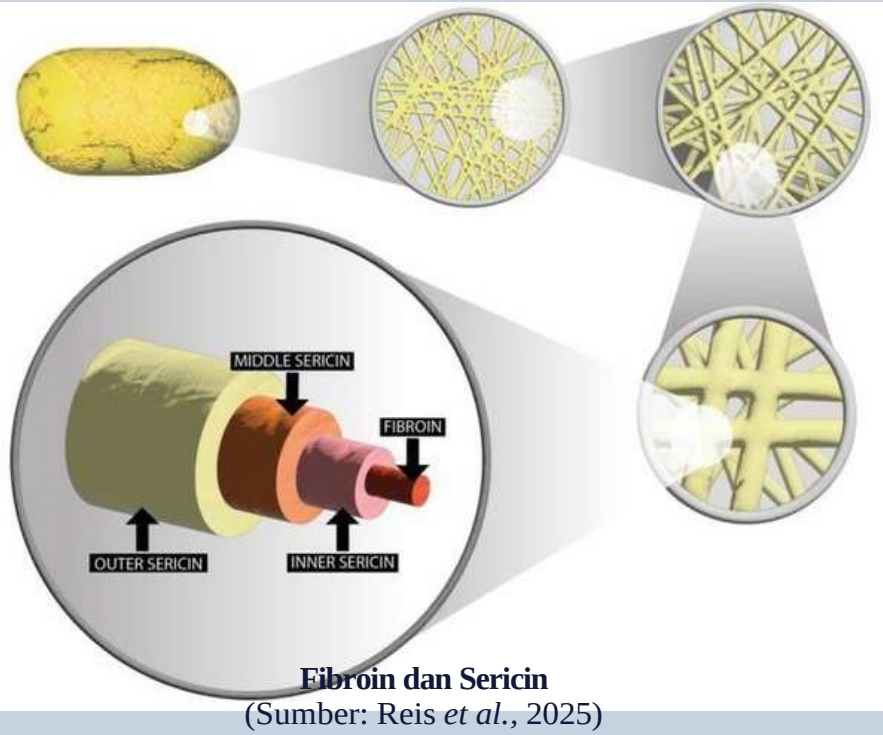
a. Fibroin

Fibroin merupakan komponen inti dan struktural dari setiap filamen sutera, ditunjukkan sebagai inti berongga pada penampang melintang benang di Gambar 1 (kiri atas), yang terdiri dari fibril fibroin. Protein ini tersusun dari rantai polipeptida panjang yang kaya akan asam amino glisin, alanin, dan serin. Karakteristik utama fibroin adalah kemampuannya membentuk struktur lembaran beta terlipat *(beta-pleated sheets)*, yang disebut juga Silk II β-sheet nanocrystals pada bagian yang diperbesar di Gambar.

Konformasi sekunder ini memberikan benang sutera kekuatan tarik *(tensile strength)* yang luar biasa, menjadikannya salah satu serat alami terkuat. Sifat *hidrofobik fibroin* (ditunjukkan dengan blok merah pada rantai *polipeptida Heavy Chain* di Gambar 1) juga berkontribusi pada stabilitas dan ketahanannya terhadap degradasi. Pada tingkat molekuler, rantai *Heavy Chain* ini membentuk struktur sekunder dengan *N-terminus* dan *C-terminus*, serta berinteraksi melalui ikatan hidrogen, seperti yang terlihat pada detail Silk II di Gambar 1.

b. Serisin

Bagian yang melapisi filamen fibroin adalah serisin, protein lain yang berfungsi sebagai matriks perekat alami, ditunjukkan sebagai lapisan terluar pada penampang benang di Gambar (kiri atas). Serisin bersifat hidrofilik (ditunjukkan dengan area biru pada bagian yang diperbesar dari Silk I) dan memiliki kemampuan untuk merekatkan dua filamen fibroin yang diproduksi secara paralel oleh kelenjar sutera ulat. Peran utama serisin adalah menyatukan filamen-filamen ini untuk membentuk satu untaian benang yang kohesif selama pembentukan kokon. Dalam aplikasi tekstil, serisin umumnya dihilangkan melalui proses "*degumming*" untuk meningkatkan kelembutan, kilau, dan daya serap pewarna benang sutera. Struktur amorf serisin juga digambarkan dalam detail .



Fibroin dan Sericin
(Sumber: Reis *et al.*, 2025)

7. Proses Pengolahan Kokon Menjadi Benang Sutra

Kokon ulat sutra merupakan sumber utama dalam produksi benang sutra alami. Sutra telah dikenal sebagai bahan tekstil mewah dan bernilai tinggi karena kehalusan, kekuatan, serta kilau alami yang dimilikinya. Di Indonesia, produksi benang sutra masih terbatas, meskipun bahan baku berupa kokon cukup potensial dikembangkan, salah satunya berasal dari ulat sutra jenis *Bombyx mori* dan *Samia cynthia ricini*.

Pengolahan kokon menjadi benang sutra memerlukan proses bertahap yang teliti, mulai dari pemanenan kokon, perebusan, pemintalan, hingga penggulungan benang. Keterampilan ini juga sering diwariskan secara turun- temurun di daerah penghasil sutra seperti Mandar (Sulawesi Barat), Wajo (Sulawesi Selatan), dan Soppeng.

a. Pengeringan Kokon

Tahap pertama dalam pengolahan kokon adalah pengeringan, yang bertujuan untuk menghentikan aktivitas pupa agar tidak merusak struktur serat. Pengeringan dilakukan segera setelah kokon dipanen. Ada berbagai metode yang digunakan, seperti penjemuran di bawah sinar matahari, perebusan dalam air panas, penguapan menggunakan uap air, hingga sistem ruangan tertutup dengan aliran udara panas. Pemilihan metode ini tergantung pada jumlah kokon dan fasilitas yang tersedia. Proses ini penting karena keberhasilan tahapan selanjutnya sangat bergantung pada kualitas pengeringan ini.

b. Pembersihan dan Penyortiran Kokon

Setelah dikeringkan, kokon dibersihkan dari lapisan luar yang terdiri dari filamen kusut dan debu. Jika tidak dibersihkan, lapisan ini akan menyulitkan pencarian ujung filamen saat proses pemintalan. Pembersihan dapat dilakukan secara manual dengan tangan atau menggunakan alat ber-rol. Setelah itu, kokon disortir berdasarkan ukuran, kebersihan, dan kualitas keutuhan. Kokon yang rusak atau cacat biasanya tidak digunakan untuk produksi benang, melainkan dimanfaatkan untuk produk kerajinan tangan.

c. Penyimpanan kokon

Kokon yang belum akan langsung diproses dapat disimpan untuk sementara waktu. Penyimpanan dilakukan di ruangan yang sejuk, kering dan memiliki sirkulasi udara yang baik agar kokon tidak lembap dan berjamur. Dalam kondisi

tertentu, penyimpanan memerlukan perlindungan tambahan menggunakan zat anti hama seperti formalin. Kokon juga haru diaduk secara berkala untuk menjaga bentuk dan sirkulasi udara di sekelilingnya.

d. Pemasakan kokon

Pemasakan kokon bertujuan untuk melunakkan serisin, yaitu zat perekat alami yang menyatukan filamen pada dinding kokon. Dalam proses ini, kokon direndam dalam air panas atau terkena uap panas selama beberapa menit. Serisin yang melunak akan memudahkan proses penarikan filamen. Air yang digunakan harus memenuhi standar tertentu seperti bersih, netral atau sedikit basa, serta tidak mengandung zat berbahaya yang dapat merusak serat. Kokon yang dimasak dengan baik akan menunjukkan ciri khas: mudah disisir, filamen bersih, dan serat tidak mudah putus.

e. Penyikatan Kokon

Langkah selanjutnya adalah penyikatan, yaitu proses untuk menemukan ujung filamen sutera dari kokon. Penyikatan dapat dilakukan secara manual menggunakan sikat dari batang padi atau dengan alat mekanik otomatis yang dirancang khusus untuk tugas ini. Proses ini sangat penting karena keberhasilan reeling bergantung pada kemudahan dalam menarik filamen dari titik awalnya. Suhu air selama penyikatan dijaga agar tetap hangat, sekitar 85˚C, untuk mempertahankan kelunakan serisin.

f. *Reeling* atau Pemintalan Benang

Reeling adalah inti dari proses pengolahan kokon menjadi benang. Filamen -filamen dari beberapa kokon yang telah disikat ditarik secara bersamaan dan digabungkan menjadi satu helai benang. Proses ini membutuhkan ketelitian tinggi agar benang tidak putus dan hasilnya tetap halus serta seragam. Ada beberapa jenis benang yang dihasilkan, seperti *raw silk* (benang utama), *thrown silk* (gabungan filamen), *spun silk* (dari serat pendek), dan duppion silk (dari kokon ganda). Benang hasil reeling awalnya digulung pada spool kecil sebelum ke tahap berikutnya.

g. *Re-Reeling* atau Penggulungan Ulang

Benang dari spool kecil kemudian dipindahkan ke gulungan besar atau disebut strengan. Proses ini dilakukan untuk menyambung filamen yang putus, merapikan bentuk benang, serta menghilangkan sisa kotoran atau getah. Penggulungan ulang juga penting untuk menghasilkan produk benang yang sesuai standar ukuran dan berat. Biasanya, satu gulungan memiliki bobot 70 - 140 gram dan memiliki keliling ± 150 cm.

h. Penggintiran (*Twisting*) Benang

Benang sutera mentah hasil *re-reeling* masih perlu diproses lebih lanjut agar siap untuk ditenun. Dalam tahap ini, beberapa helai benang dirangkap dan diputar menjadi satu (*digintir*), lalu dikukus agar stabil. Proses ini menghasilkan benang yang lebih kuat, seragam, dan tidak mudah kusut. Setelah penggitiran, benang dikeringkan dan disusun kembali dalam bentuk gulungan besar (*ukel*) yang siap dipakai atau dijual.

i. Degumming atau Pemasakan Benang Mentah

Degumming adalah proses akhir untuk menghilangkan sisa serisin yang masih menempel pada benang. Proses ini penting agar benang tidak kaku dan dapat menyerap warna dengan baik dalam proses ini pewarnaan selanjutnya. Degumming dilakukan dengan meredam benang dalam larutan alkali hangat, kemudian dibilas hingga bersih dan dikeringkan. Hasilnya adalah benang yang lembut, ringan, dan memiliki kilau alami khas sutera.

Video Proses Pembentukan Kokon



8. Pemanfaatan Benang Sutra Dalam Industri

a. Industri Kesehatan

Bitar et al. (2024) memberikan penjelasan tentang Fibroin ulat sutra *(Bombyx mori)* sebagai bahan Biomaterial dalam Aplikasi Bioteknologi Molekuler. Fribroin merupakan protein utama dalam serta sutra yang memiliki sifat biokompatibel, biodegradable, serta stabil secara mekanik. Fibroin dari ulat sutra banyak digunakan dalam bidang bioteknologi medis karena dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk bahan seperti film, membran, hidrogel, dan scaffold. Struktur molekuler fibroin tersusun atas tiga komponen utama, yaitu heavy chain fibroin (H-Fb) sebesar 390 kDa, Light chain fibroin (L-Fb) sebesar 26 kDa, dan glikoprotein P25 sebesar 30 kDa. Ketiga protein ini membentuk struktur kompleks yang berperan penting dalam menciptakan kekuatan dan elastisitas serat sutra. Struktur molekuler fibroin juga memungkinkan proses rekayasa atau modifikasi genetik untuk keperluan medis dan industri. Bentuk produk fibroin untuk aplikasi medis antara lain :

1). *Scafflod* untuk rekayasa jaringan tulang dan kulit

2). Film dan membran untuk penyembuhan luka dan rekonstruksi kornea

3). *Hidrogel* untuk lensa kontak dan pengatar obat
4). Partikel nano dan mikrokapsul untuk terapi kanker dan pengiriman DNA.
5). Metode fabrikasi yang digunakan antara lain: *Electrospinning*, *freese-drying*, film casting dan *gel spinning*.'

b. Industri Makanan

Ulat sutera *(Bombyx mori)* memiliki potensi besar sebagai sumber protein alternatif yang berkelanjutan. Menurut Van Huis (2016), ulat sutra merupakan sumber protein berkualitas tinggi yang dapat digunakan dalam berbagai produk pangan, baik untuk konsumsi manusia maupun pakan ternak. Kandungan nutrisinya mencakup protein, lemak sehat, vitamin, dan mineral yang bermanfaat bagi kesehatan manusia. Selain itu, ulat sutra juga memiliki keunggulan dalam hal efisiensi konversi pakan dan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah dibandingkan dengan sumber protein hewani konvensional.

Pupa ulat sutra mengandung sekitar 48-58% protein berdasarkan berat kering, menjadikannya sumber protein yang sangat baik (Choi et al., 2017). Selain itu, pupa ulat sutra juga kaya akan lemak sehat, termasuk asam lemak omega-3 dan omega-6, serta vitamin dan mineral penting seperti zat besi dan seng. Kandungan nutrisi ini menjadikan ulat sutra sebagai bahan edible yang potensial untuk diperkaya dalam berbagai produk pangan, seperti biskuit energi tinggi, pasta, dan makanan ringan (Altomare et al., 2020)

Meskipun memiliki nilai gizi yang tinggi, penerimaan masyarakat terhadap komsumsi ulat sutra masih menghadapi tantangan, terutama dinegara-negara barat. Persepsi negatif terhadap serangga sebagai makanan dan kurangnya informasi mengenai manfaatnya menjadi hambatan utama. Namun, di beberapa negara Asia seperti Korea, Jepang, dan Vietnam, konsumsi ulat sutra sudah menjadi bagian dari budaya kuliner lokal.



Produk Makanan dari Ulat Sutera
(Sumber: Amazon)

c. Industri Tekstil

Industri tekstil merupakan salah satu sektor utama yang memanfaatkan ulat sutra, khususnya spesies *Bombyx mori* sebagai sumber utama serat sutra alami. Serat sutra yang dihasilkan oleh ulat ini dikenal karena kehalusannya, kekuatannya, serta kilau alaminya, menjadikannya bahan baku yang sangat dihargai dalam pembuatan produk testil mewah seperti pakaian, aksesori, dan kain tenun berkualitas tinggi.

Sebagai bahan baku tekstil yang bernilai tinggi, ulat sutra memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan, terutama di negara-negara penghasil utama seperti Tiongkok dan India. Di Indonesia budidaya ulat sutra juga berkembang dengan beberapa daerah seperti Sulawesi Selatan dan Jawa Timur menjadi sentra produksi kokon dan benar sutra (Agustarini dkk., 2022). Namun, industri sutra menghadapi tantangan dalam aspek keberlanjutan produksi. Proses budidaya ulat sutra dan pengolahan kokon menjadi benang sutra memerlukan sumber daya yang besar, termasuk penggunaan air dan energi yang signifikan.

Selain itu, penggunaan bahan kimia dalam proses degumming untuk menghilangkan serisin dari serat sutra dapat menimbulkan dampak lingkungan. Untuk mengatasi tantangan tersebut berbagai penelitian dan inovasi dilakukan guna mengembangkan teknik produksi sutra yang lebih ramah lingkungan. Salah satunya adalah pemanfaatan limbah kokon yang tidak layak menjadi benang sutra sebagai bahan baku produk kerajinan, pakan ternak, atau bahkan bahan kosmetik (Maharani dkk., 2022). Selain itu, upaya peningkatan kualitas kokon melalui persilangan hibrida ulat sutra juga dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas budidaya (Agustarini dkk., 2022)



Industri Tekstil Benang Sutera
(Sumber: Tuku Singapore)



9. Manfaat Ekonomi Dari Ulat Sutra

a. Penciptaan Lapangan Kerja

Industri benang sutra di Indonesia, khusunya di daerah sentra produksi seperti Sulawensi Selatan, telah memberikan kontribusi signifikan dalam menciptakan lapangan kerja bagi masyarakat pedesaan. Serikultur, sebagai industri padat karya, melibatkan berbagai tahapan produksi mulai dari budidaya pohon murbei, pemeliharaan ulat sutra, hingga pemintalan benang dan penenunan kain. Kegiatan ini tidak hanya menyediakan pekerjaan bagi petani dan pengrajin, tetapi juga membuka peluang usaha bagi pelaku industri kecil dan menengah. Menurut penelitian Muin & Andadari (2021), penerapan teknologi serikultur melalui penggunaan varietas murbei hibrida dan ulat sutra hibrida dapat meningkatkan produksi kokon petani sebesar 21,4% hingga 36,4%, serta meningkatkan produksi filamen sutra sebesar 75,4% hingga 358,8% per kotak ulat, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan pendapatan dan kesejahteraan petani sutra

b. Pemberdayaan Industri Rumah Tangga

Sebagian besar industri benang sutra di Indonesia dikelola oleh industri rumah tangga yang secara mandiri melakukan kegiatan pertenunan. Model usaha ini memungkinkan keterlibatan langsung anggota keluarga dalam proses produksi, sehingga memberdayakan perempuan dan kelompok rentan lainnya. Namun, industri rumah tangga menghadapi tantangan dalam hal akses terhadap model, teknologi, dan pasar yang lebih luas. Penelitian oleh Pramanick (2025) menyoroti pentingnya dukungan pemerintah dan lembaga terkait dalam menyediakan pelatihan, fasilitas produksi, dan akses pasar untuk meningkatkan kapasitas dan daya saing industri rumah tangga di sektor serikultur.

c. Peningkatan Ekspor

Sutra tidak hanya digunakan sebagai bahan baku tekstil, tetapi juga memiliki potensi besar dalam industri kosmetik dan medis. Komponen seperti fibroin dan serisin yang terkandung dalam sutra digunakan dalam pembuatan produk-produk seperti krim anti-penuaan, masker wajah, dan bahan jahitan bedah. Hal ini membuka peluang ekspor bagi produk-produk berbahan dasar sutra, yang dapat meningkatkan pendapatan negara. Menurut laporan oleh Bitar et al., (2024), pengembangan produk berbasis sutra untuk aplikasi biomedis dan kosmetik memiliki prospek pasar yang menjanjikan di tingkat global.

F. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……

No. Absen : ……

Kelompok : ……

Jawablah pertanyaan berikut dengan singkat dan uraikan secara lengkap format doc/pdf

1. Penentuan Pertanyaan Mendasar

a. Jelaskan secara mendalam tahapan-tahapan kunci dalam proses pembuatan sutra dari ulat sutra (Bombyx mori), mulai dari telur hingga panen kokon. Analisis bagaimana morfologi, anatomi, dan fisiologi Bombyx mori secara spesifik mendukung kemampuannya untuk menghasilkan serat sutra yang bernilai ekonomi tinggi.

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

b. Dengan memanfaatkan spesimen digital atau model *3D* ulat sutra (Bombyx mori), identifikasi dan jelaskan secara rinci struktur morfologi eksternal dan internal yang paling krusial dalam proses produksi sutra. Analisis bagaimana eksplorasi digital ini dapat meningkatkan pemahaman Anda tentang keterkaitan antara struktur dan fungsi dalam menghasilkan produk ekonomi.





c. Selain ulat sutra, identifikasi dan jelaskan dua jenis serangga lain yang memiliki potensi ekonomi signifikan (misalnya, lebah madu, jangkrik, kumbang tanduk, atau maggot BSF). Untuk setiap serangga yang Anda pilih, uraikan bagaimana pengetahuan dasar entomologi (misalnya, siklus hidup, habitat, perilaku) dapat digunakan untuk mengevaluasi dan mengembangkan potensi ekonominya dalam kehidupan manusia.

d. Pilih satu jenis serangga bernilai ekonomi (selain ulat sutra) dan analisis secara mendalam keterkaitan antara struktur tubuh (morfologi dan anatomi) dan ekologi serangga tersebut dengan kemampuannya menghasilkan produk atau jasa yang bernilai ekonomi. Berikan contoh konkret bagaimana adaptasi biologis serangga tersebut mendukung pemanfaatannya.

Caput :

Toraks :

Abdomen :

Adaptasi biologis :

e. Lakukan perbandingan potensi ekonomi antara ulat sutra (Bombyx mori) dengan satu serangga penghasil bahan bernilai ekonomi lainnya yang telah atau berpotensi dikembangkan di Indonesia. Bandingkan dari segi biaya produksi, nilai jual produk, tantangan budidaya, dan kemungkinan adanya dampak lingkungan yang ditimbulkan.

f. Sebagai seorang pendidik biologi, rancanglah sebuah program edukasi atau inisiatif inovatif yang memanfaatkan serangga bernilai ekonomi (selain ulat sutra) untuk mendukung kesejahteraan masyarakat lokal dan konservasi lingkungan. Jelaskan bagaimana program ini dapat diintegrasikan dalam kurikulum biologi atau diterapkan di komunitas, termasuk tujuan pembelajaran, metode penyampaian, serta potensi tantangan dan strategi mengatasinya.

G. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiti kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,



H. GLOSARIUM

- Diferensiasi Sel: Proses di mana sel-sel kurang spesifik menjadi sel-sel yang lebih khusus dengan fungsi tertentu.
- Ecdysone: Hormon utama pada serangga yang memicu proses pergantian kulit (molting) dan diferensiasi sel.
- Epigenetik (Mekanisme Epigenetik): Perubahan pada ekspresi gen yang tidak melibatkan perubahan urutan DNA, tetapi dapat memengaruhi bagaimana gen dibaca oleh sel.
- Ekspresi Genetik: Proses di mana informasi yang terkode dalam gen digunakan untuk membuat produk gen, seperti protein, yang memiliki fungsi dalam sel.
- Filamen Sutra: Benang yang sangat halus dan panjang yang dihasilkan oleh ulat sutra, menjadi bahan dasar kain sutra.
- Fibroin: Protein utama penyusun inti benang sutra, yang memberikan kekuatan dan elastisitas pada benang.
- Gerakan Pemintalan (Spinning): Gerakan kepala ulat sutra yang khas membentuk angka delapan secara berulang untuk menghasilkan dan membentuk kokon.
- Juvenile Hormone: Hormon pada serangga yang berfungsi mempertahankan karakteristik larva dan menunda perkembangan menuju tahap dewasa.
- Kaki Abdomen (Proleg): Kaki semu atau kaki tambahan yang tidak bersegmen pada bagian perut larva (ulat), berfungsi untuk menempel dan bergerak.
- Kaki Kaudal: Kaki abdomen terakhir dan paling besar pada ulat sutra.
- Kelenjar Labial (Kelenjar Sutra): Kelenjar khusus yang terletak di kepala ulat sutra, bertanggung jawab memproduksi protein sutra.
- Kokon: Selubung pelindung berbentuk oval yang terbuat dari benang sutra, dibentuk oleh larva ulat sutra sebagai tempat bermetamorfosis menjadi pupa.
- Prothoraks: Segmen pertama dari tiga segmen toraks (dada) serangga, yang paling dekat dengan kepala.
- Serisin: Protein perekat atau "lem" yang melapisi dan merekatkan helai-helai fibroin menjadi kokon yang padat.
- Spineret: Organ kecil seperti tabung yang terletak di bagian mulut bawah ulat sutra, tempat filamen sutra keluar saat dipintal.

Entomologi Terapan

I. REFERENSI

- Abdelli, N., Peng, L., & Keping, C. (2018). *Silkworm, Bombyx mori, as an alternative model organism in toxicological research.* Environmental Science and Pollution Research, 25(35), 35048-35054.
- Agustarini, R., Andadari, L., Heryati, Y., Sari, H., & Mulyati, E. (2022). *Peningkatan Kualitas Kokon dari Beberapa Persilangan Hibrida Ulat Sutra (Bombyx mori L.) (Improved Cocoon Quality of Multiple Silkworms (Bombyx mori L.) Hybrid Crosses).* Jurnal Penelitian Hutan Tanaman, 19(2), 189–198. https://doi.org/10.20886/jpht.2022.19.2.189-198
- Altomare, A. A., Baron, G., Aldini, G., Carini, M., & D'Amato, A. (2020). *Silkworm pupae as source of high-value edible proteins and of bioactive peptides.* Food Science and Nutrition, 8(6), 2652–2661. https://doi.org/10.1002/fsn3.1546
- Andadari, L., & Surnati Sri. (2015). *KUALITAS KOKON HASIL PERSILANGAN ANTARA ULAT SUTERA (Bombyx mory L.) RAS CINA DAN RAS JEPANG Quality of crossedbreed cocoon between Japanese and Chinese races silkworm (Bombyx mory L.)*. Pemuliaan Tanaman Hutan, 9, 43–51.
- Biganeh, H., Kabiri, M., Zeynalpourfattahi, Y., Brancalhão, R. M. C., Karimi, M., Ardekani, M. R. S., & Rahimi, R. (2022). *Bombyx mori cocoon as a promising pharmacological agent: A review of ethnopharmacology, chemistry, and biological activities.* Heliyon, 8(9).
- Bitar, L., Isella, B., Bertella, F., Bettker Vasconcelos, C., Harings, J., Kopp, A., van der Meer, Y., Vaughan, T. J., & Bortesi, L. (2024a). *Sustainable Bombyx mori's silk fibroin for biomedical applications as a molecular biotechnology challenge: A review.* In International Journal of Biological Macromolecules (Vol. 264). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130374
- Byoung Deug Choi, Nathan A. K. Wong, & Joong-Hyuck Auh. (2017). *Defatting and Sonication Enhances protein Extraction form Edible Insect.* Food Science of Animal Recources, 6, 955–961.
- Dewi Maharani, A., Bastara Zahrosa, D., & Slameto, dan. (2022). *PENINGKATAN PENGETAHUAN PENGOLAHAN PRODUK USAHA ULAT SUTERA (Samia Cynthia Riccini) ENHANCEMENT OF KNOWLEDGE SILKWORM (Samia Cynthia Riccini) BUSINESS PRODUCT MANAGEMENT.* Pengabdian Kepada Masyarakat, 2, 169–174. http://jurnal.faperta-unras.ac.id/index.php/pakdemas
- Dutta, R., Pramod, T., Oli, A. K., Vishwanatha, T., Nandikolmath, V., Sadashiv, S. O., & Patil, S. J. (2023). *Silk Biomaterials is an Essential Tool and Potential Applications in Biomedical Industries-A Review.*

Entomologi Terapan

- Ghosh, A., et al. (2021). *Evaluating alternative mulberry varieties for enhanced silk production.* Journal of Sericulture Research, 59(3), 145–158.
- Huang, Q., Huo, C., Qian, Y., Zhao, C., Cai, Z., Zhang, K., Zhao, X., Guo, S., Kan, Y., & Li, D. (2023). *m6A writer gene fl(2)d regulates the metamorphosis of silkworm Bombyx mori.* Journal of Asia-Pacific Entomology, 26(4). https://doi.org/10.1016/j.aspen.2023.102126
- Kim, H. J., Sun, Y., & Moon, M. J. (2020). *Fine structure of the silk spinning system in the caddisworm, Hydatophylax nigrovittatus (Trichoptera: Limnephilidae).* Applied Microscopy, 50(1), 16.
- Kiyosawa, M., Ito, E., Shirai, K., Kanekatsu, R., Miura, M., & Kiguchi, K. (2016). *Cocoon spinning behavior in the silkworm, Bombyx mori : Comparison of three strains constructing different cocoons in shape.* Zoological Science, 16(2), 215–223. https://doi.org/10.2108/zsj.16.215
- Muin, N., & Andadari, L. (2021). *The potential for increasing the productivity of Indonesian silk farmers.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 917(1). https://doi.org/10.1088/1755- 1315/917/1/012037
- Offord, C., Vollrath, F., & Holland, C. (2016). *Environmental effects on the construction and physical properties of Bombyx mori cocoons.* Journal of Materials Science, 51(24), 10863–10872. https://doi.org/10.1007/s10853-016-0298-5
- Pramanick, B. (2025). *Role of the Sericulture Industry for the Socio-economic Growth in the Eastern Region: A Study on West Bengal.* Pramanick Biological Forum-An International Journal, 17(1), 100.
- Prijono, A., Rawana, Woesono, H. B., & Nugroho, Y. H. (2025). *Siklus Hidup Ulat Sutera Samia ricini Daun Singkong dan Potensi Pakan dari Agroforestri Sengon dan Singkong di Widodomartani, Ngemplak, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.* Jurnal Wana Tropika, 14(2), 53–61. https://doi.org/10.55180/jwt.v14i2.1641
- Reis, S., Spencer, C., Soares, C. M., Falcão, S. I., Miguel, S. P., Ribeiro, M. P., ... & Vaz, J. (2025). *Chemical characterization and bioactivities of sericin extracted from silkworm cocoons from two regions of Portugal*. Molecules, 30(5), 1179.
- Rolff, J., Johnston, P. R., & Reynolds, S. (2019). *Complete metamorphosis of insects.* Philosophical Transactions of the Royal Society B, 374(1783), 20190063.

- Sivaprasad, S., & Bhuvaneswari, E. (2018). *Energetics of pupal-adult metamorphosis in the silkworm, Bombyx mori : An analysis of transdeamination parameters in the fat body and haemolymph.* Journal of Applied and Natural Science, 10(2), 746–752. https://doi.org/10.31018/jans.v10i2.1681
- Sparkes, J., & Holland, C. (2017). *Analysis of the pressure requirements for silk spinning reveals a pultrusion dominated process.* Nature communications, 8(1), 594.

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB VIII

"Parasitisme oleh Serangga"

Serangga : Tawon parasitoid (Ichneumonidae)



A. PETUNJUK *E-WORKSHEET*

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "Parasitisme oleh Serangga". Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet*. Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep "Parasitisme oleh Serangga".
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi *AR* yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal Jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest*. Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

Entomologi Terapan

B. PRETEST (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti pretest singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini brtujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *Pretest* secara luring maupun daring dengan memindai *bercode* berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.



SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*



C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Parasitisme oleh Serangga (Tawin Parasitoid Ichneumonidae).
Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu mengidentifikasi karakteristik morfologi kunci dari berbagai spesies tawon Ichneumonidae yang relevan dengan parasitismenya.
2. Peserta didik mampu menjelaskan secara komprehensif siklus hidup tawon *Ichneumonidae* sebagai *parasitoid*, menganalisis berbagai strategi *parasitisme* (misalnya, *endoparasitoid* vs. *ektoparasitoid*, *koinobiont* vs. *idiobiont*).
3. Peserta didik mampu mampu merancang protokol observasi lapangan atau percobaan laboratorium sederhana untuk mengamati perilaku pencarian inang dan oviposisi tawon *Ichneumonidae*, serta mendokumentasikan data menggunakan fitur anotasi pada *E-worksheet AR.*
4. Peserta didik dapat mengevaluasi potensi tawon Ichneumonidae sebagai agen pengendali hayati dalam pengendalian hama terpadu (PHT), menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitasnya, dan menyajikan rekomendasi aplikasi berdasarkan studi kasus nyata.

Alat dan Bahan :

- PC atau laptop atau Gawai
- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

Metode Pembelajaran :

- Simulasi
- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. PENDAHULUAN

Tawon parasitoid dari famili Ichneumonidae merupakan serangga penting dalam ekosistem. Termasuk ke dalam ordo Hymenoptera, kelompok ini sering disebut sebagai tawon ichneumon.

Perannya sangat menonjol dalam pengendalian hayati. Betina meletakkan telur di dalam tubuh inang, biasanya ulat dari ordo Lepidoptera. Setelah menetas, larva akan memakan jaringan tubuh inang dari dalam hingga akhirnya menyebabkan kematian. Walaupun tampak <kejam=, mekanisme ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan populasi serangga dan mengendalikan hama secara alami. Dalam sistem pertanian, ulat pemakan daun sering menjadi hama utama. Salah satu solusi pengendalian alami yang efektif adalah dengan memanfaatkan tawon parasitoid dari famili Ichneumonidae. Dengan menggunakan tubuh ulat sebagai inang untuk perkembangbiakan, serangga ini dapat mengurangi populasi hama tanpa perlu penggunaan pestisida kimia

Klasifikasi ilmiah Ichneumonidae adalah sebagai berikut:

- Kerajaan (Kingdom): Animalia
- Filum (Phylum): Arthropoda
- Kelas (Class): Insecta
- Ordo (Order): Hymenoptera
- Superfamili (Superfamily): Ichneumonoidea
- Famili (Family): Ichneumonidae

E. MATERI 1

1. Peranan Ekologis Tawon Ichneumonidae

a. Pengendali Populasi Serangga

Tawon Ichneumonidae memang berperan sebagai regulator alami populasi serangga, terutama pada serangga holometabola (bermetamorfosis sempurna) seperti larva Lepidoptera (kupu-kupu/ngengat), Coleoptera (kumbang), Diptera (lalat), dan kadang juga Hymenoptera lainnya. Peran ini membantu mencegah ledakan populasi hama dan menjaga keseimbangan ekosistem.

b. Agen Pengendalian Hayati

Banyak spesies Ichneumonidae telah diuji atau dimanfaatkan dalam program pengendalian hayati di pertanian dan kehutanan. Dengan memangsa hama target, mereka membantu mengurangi penggunaan pestisida kimia dan mendukung pertanian berkelanjutan serta ramah lingkungan.

c. Spesifisitas terhadap Inang

Sebagian besar Ichneumonidae menunjukkan spesifisitas tinggi terhadap inangnya (host specificity). Ini membuat mereka efektif dalam menekan hama spesifik tanpa menimbulkan dampak besar pada organisme non-target. Namun, penting dicatat: ada juga spesies dengan rentang inang yang lebih luas (generalist). Jadi tidak semuanya ketat host-specific, tetapi banyak yang cukup selektif.

d. Kontribusi terhadap Keanekaragaman Hayati

Ichneumonidae termasuk salah satu famili terbesar dalam ordo Hymenoptera, dengan lebih dari 25.000 spesies dideskripsikan (bahkan estimasi total bisa mencapai >100.000 spesies). Tingginya keanekaragaman mereka menambah kompleksitas ekosistem dan menjadikan kelompok ini indikator penting kesehatan lingkungan.

[*Ichneumonids of North America*]

F. MATERI 2

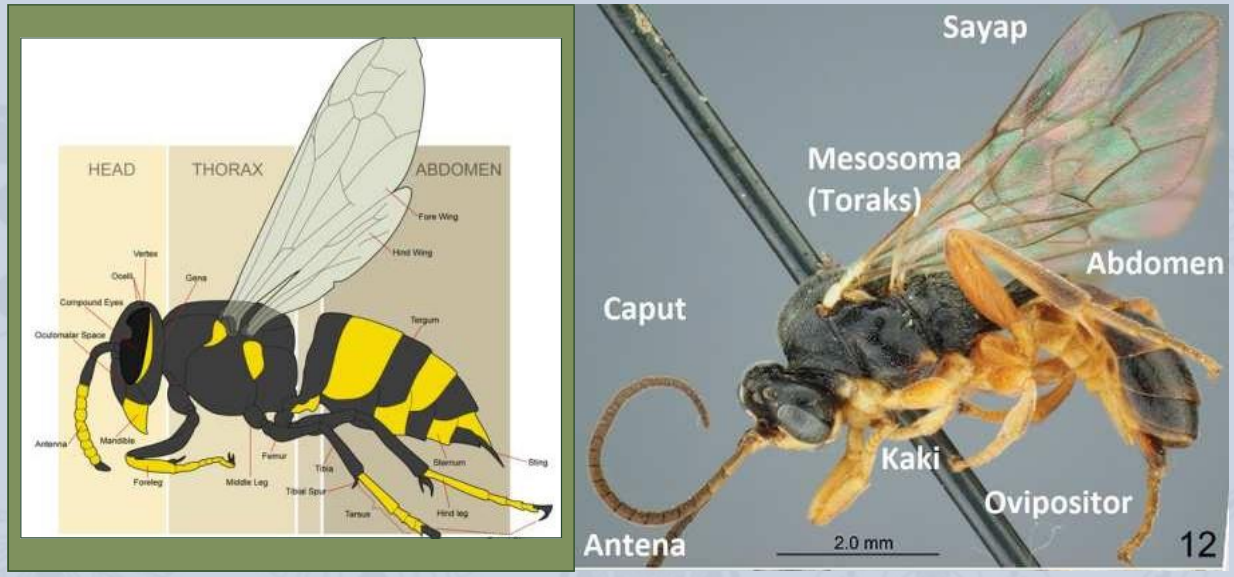
1. Morfologi Tawon *Ichneumonidae*

Morfologi Tawon *Ichneumonidae*

Tawon dari famili *Ichneumonidae* merupakan kelompok serangga parasitoid yang sangat bervariasi baik dari segi bentuk tubuh maupun habitatnya. Karakteristik morfologinya menunjukkan adaptasi yang kuat terhadap peran mereka sebagai parasitoid, terutama terkait kemampuan mengenali, mencari, dan meletakkan telur pada inang tertentu.

a. Dimensi dan Struktur Tubuh

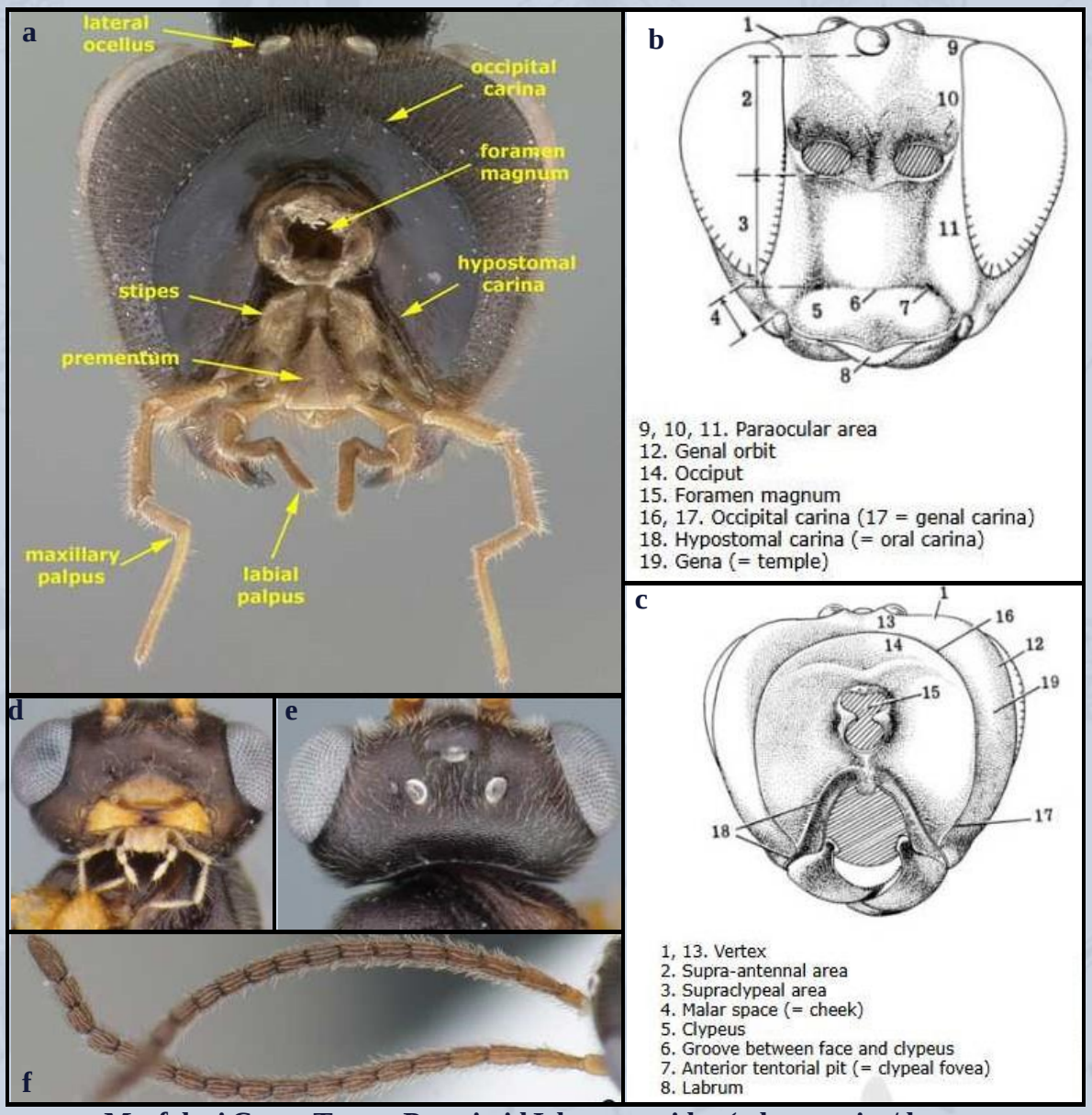
Ichneumonidae merupakan famili tawon parasitoid yang secara morfologi dicirikan oleh pembagian tubuh yang jelas menjadi tiga tagmata utama: Caput (kepala), *Mesosoma* (gabungan toraks dan segmen pertama abdomen), dan Abdomen (sisa abdomen posterior). Ukuran tawon *Ichneumonidae* sangat beragam, berkisar antara 2 hingga lebih dari 20 mm, bergantung pada spesies dan jenis inang yang ditumpanginya. Mesosoma adalah bagian tengah yang kokoh dan berotot, secara fungsional berfungsi sebagai pusat lokomosi; di sinilah ketiga pasang Kaki melekat, serta dua pasang Sayap membranosa transparan yang khas, diadaptasi untuk penerbangan aktif.



Morfologi Tawon Parasitoid Ichneumonidae
(Sumber: amentinst.org)

Caput anterior menopang sepasang Antena multisegmen yang panjang dan seringkali melengkung, serta organ-organ mulut yang beradaptasi untuk makan nektar atau cairan inang. Secara internal, mesosoma menampung otot-

otot terbang yang kuat. Posterior dari mesosoma, Abdomen terhubung melalui pedicel yang sempit (tidak selalu terlihat jelas pada semua spesies *Ichneumonidae*), dan pada individu betina, terdapat *Ovipositor* yang menonjol di ujung posterior abdomen. *Ovipositor* ini merupakan organ khusus yang digunakan untuk menembus tubuh inang dan meletakkan telur. Umumnya, bentuk tubuhnya langsing, memanjang, serta tersusun dalam segmen-segmen yang jelas. Struktur tubuh ini dirancang untuk memudahkan mobilitas di ruang sempit seperti jaringan tumbuhan, kayu, atau tubuh inang. Skala pada gambar menunjukkan panjang tubuh sekitar 2.0 mm, menunjukkan ukuran serangga ini yang relatif kecil dan merupakan contoh pada ujung bawah rentang ukuran famili tersebut.



Morfologi Caput Tawon Parasitoid Ichneumonidae (a-b=anterior/depan, c,e=superior/atas, d=inferior/bawah, f=antena)
(Sumber: amentinst.org)

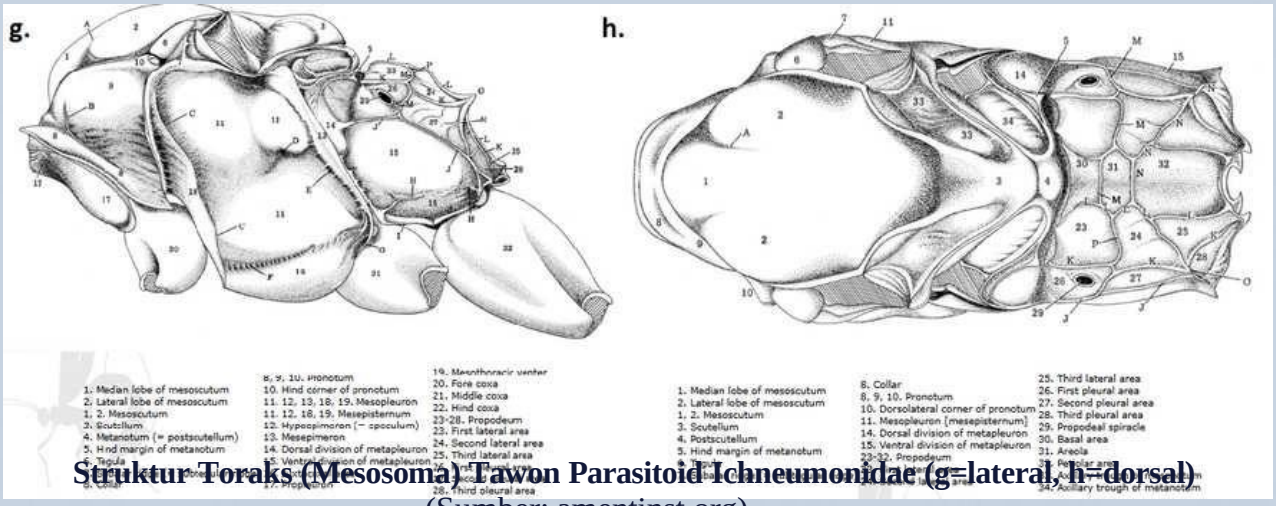
b. Caput (Kepala) dan Antena

Morfologi kepala (Caput) tawon *Ichneumonidae* menunjukkan adaptasi kompleks untuk fungsi sensorik dan makan. Bagian anterior didominasi oleh mata majemuk yang besar untuk penglihatan, dan sepasang antena panjang multisegmen yang muncul dari pangkal frontal, berfungsi sebagai organ peraba dan penciuman utama untuk navigasi dan deteksi inang. Bagian oral memiliki *labrum* (bibir atas) dan sepasang palpus maksila serta labial yang menonjol, struktur tambahan yang membantu dalam manipulasi makanan dan mengasup cairan seperti *nektar* atau *hemolimf inang*. Struktur bagian posterior kepala, termasuk foramen magnum (lubang tempat saraf dan pembuluh darah masuk ke toraks) dan karina oksipital (tonjolan atau punggungan di bagian belakang kepala), mengindikasikan integrasi yang kuat dengan mesosoma serta memberikan dukungan struktural untuk pergerakan kepala dan fungsi neurologis. Detail seperti area paraokular (area di sekitar mata), gena (pipi), dan klypeus (pelat yang terletak di antara dahi dan labrum) juga menjadi karakter penting dalam *taksonomi* famili ini, seringkali digunakan untuk identifikasi spesies. Tipe antena filiform yang dimiliki tawon Ichneumonidae terletak di caput dan tersusun atas banyak ruas (bisa lebih dari 16) dan sangat peka terhadap rangsangan kimia di lingkungan sekitar. Antena ini berfungsi mendeteksi keberadaan inang melalui sinyal kimia seperti feromon atau senyawa volatil, sehingga membantu mengarahkan gerakan tawon secara presisi menuju targetnya.

c. Toraks (Dada/Mesosoma) dan Sayap

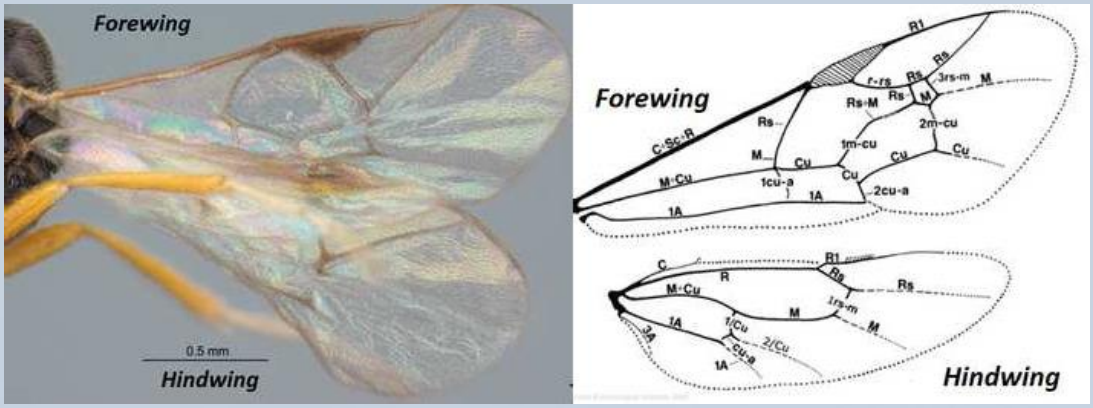
Toraks (mesosoma) tawon *Ichneumonidae*, yang secara fungsional merupakan toraks yang menyatu dengan segmen pertama abdomen *(propodeum)*, adalah struktur yang kokoh dan kompleks, dirancang untuk lokomosi. Dalam pandangan lateral (gambar g), mesosoma tawon *Ichneumonidae* menunjukkan kompleksitas struktural yang mendukung lokomosi. Bagian paling dominan adalah mesonotum yang besar, dengan lobus median (1) dan lateral (2) yang jelas, menjadi area perlekatan utama bagi otot-otot sayap. Pleura, yang membentuk dinding samping, terbagi menjadi *propleuron* (17), *mesopleuron* (12, 18), dan *metapleuron* (14), yang masing-masing menopang koksa (pangkal kaki) depan (20), tengah (21), dan belakang (22). Tegula (6) yang menutupi pangkal sayap, serta collar (7) di bagian anterior, juga terlihat jelas, menekankan integrasi fungsional untuk penerbangan dan pergerakan.

Dari pandangan dorsal (gambar h), *mesosoma* memperlihatkan detail pada *mesonotum* dan *propodeum*. Terlihat jelas lobus median (1) dan lateral (2) *mesonotum*, serta *skutelum* (3) dan *metascutum* (4) yang menonjol di bagian *posterior mesonotum*. *Propodeum* (23-28), yang merupakan segmen pertama abdomen yang menyatu dengan toraks, menempati bagian paling posterior dari *mesosoma*. Pada banyak spesies *Ichneumonidae*, *propodeum* ini dicirikan oleh serangkaian karina (tonjolan atau punggungan) dan area-area yang terdefinisi (misalnya, area basal, areola, area lateral) yang sangat penting untuk identifikasi *taksonomi*. Morfologi kompleks *mesosoma*, baik dari lateral maupun dorsal, mencerminkan adaptasi tawon *Ichneumonidae* sebagai serangga terbang yang aktif, lincah, dan seringkali harus menembus substrat keras untuk mencari inang.



Struktur Toraks (Mesosoma) Tawon Parasitoid Ichneumonidae (g=lateral, h=dorsal)
(Sumber: amentinst.org)

Sayap *Ichneumonidae* (gambar i), terdiri dari *Forewing* (sayap depan) dan *Hindwing* (sayap belakang), memiliki pola vena *membranosa* yang transparan dan khas, esensial untuk identifikasi spesies. Pada *Forewing*, ciri utama diagnostik meliputi vena 2m-cu yang menghubungkan M dan Cu, serta areolet —sel kecil yang dikelilingi vena, terbentuk oleh r-rs, Rs, dan 3rs-m, dengan bentuk yang bervariasi *antarspesies*. Sementara itu, *Hindwing* menunjukkan pola vena yang lebih sederhana namun tetap penting untuk taksonomi, seperti vena 1rs-m. Secara keseluruhan, struktur vena yang efisien ini mendukung kemampuan terbang tawon *Ichneumonidae* dalam mencari inang. Sayap tawon *Ichneumonidae* mengepak dengan cepat dalam lintasan kompleks yang sering menyerupai angka delapan, didorong oleh kontraksi otot-otot terbang tidak langsung di dalam *mesosoma*. Gerakan ini menciptakan pusaran udara yang menghasilkan gaya angkat dan dorong, memungkinkan penerbangan.



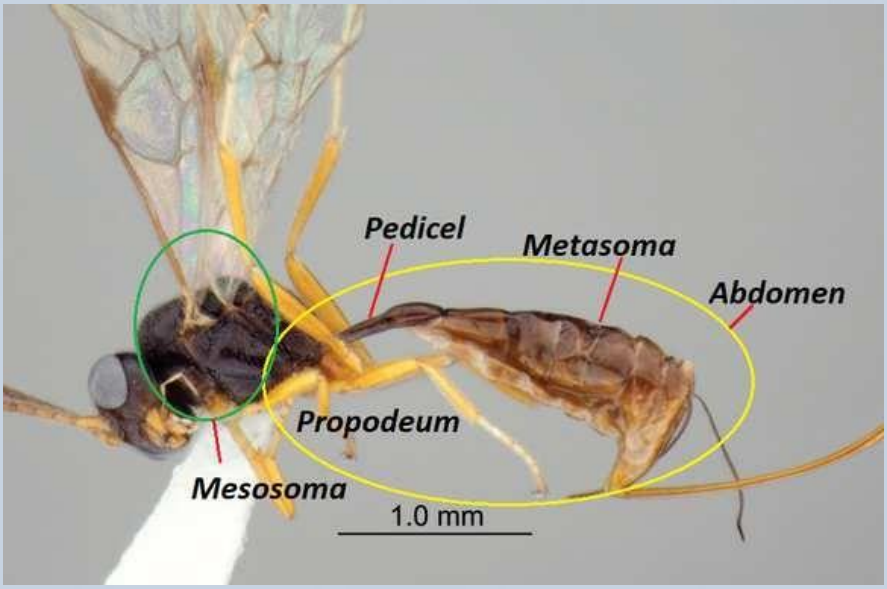
Sayap Tawon parasitoid Ichneumonidae

(Sumber: amentinst.org)

d. Abdomen

Pada tawon *Ichneumonidae*, abdomen menunjukkan *segmentasi* dan modifikasi unik yang esensial untuk fungsi reproduksi parasitoid. *Propodeum*, yang secara embrionik merupakan segmen abdomen pertama, telah menyatu sepenuhnya dengan toraks membentuk bagian posterior mesosoma, dan seringkali memiliki pola karina (tonjolan) yang khas.

Selanjutnya, *pedicel*, atau segmen abdomen kedua yang termodifikasi menjadi tangkai ramping, berfungsi sebagai "pinggang" yang menghubungkan *mesosoma* dengan sisa abdomen. Penyempitan ini memungkinkan *metasoma* (gaster) yakni segmen abdomen ketiga hingga terakhir—untuk bergerak secara fleksibel dan independen. Fleksibilitas metasoma ini krusial, terutama pada tawon betina, untuk memposisikan *ovipositor* (struktur panjang seperti jarum di ujung abdomen) secara akurat saat mencari dan menembus inang untuk meletakkan telur.

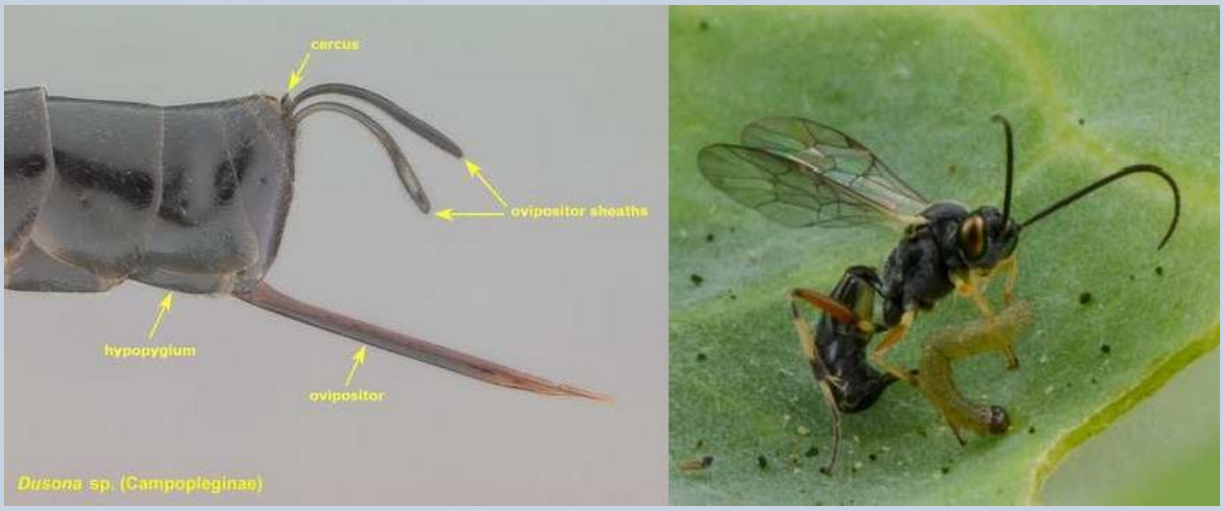


Toraks (mesosoma) dan Abdomen (Propodium, pedicel, metasoma) Tawon Parasitoid

(Sumber: amentinst.org)

e. *Ovipositor* (Alat Peletak Telur pada Betina) dan Aedeagus (pada Jantan

Ovipositor pada tawon *Ichneumonidae* betina berbentuk panjang, ramping, dan sering melebihi panjang tubuh. Alat ini digunakan untuk menyisipkan telur ke dalam tubuh atau tempat persembunyian inang, seperti batang tanaman. Telur yang disuntikkan ke inang, seperti larva *Plutella xylostella*, akan berkembang menjadi larva parasitoid di dalam tubuh inang.



Ovipositor pada Betina (Kiri) dan
Saat Tawon Parasitoid Menginjeksikan Telur ke *Plutella xylostella* (Kanan)
(Sumber: amentinst.org; Tim Haye Flickr)

Durasi pertumbuhan larva ini bervariasi tergantung spesies dan kondisi lingkungan, namun umumnya berlangsung beberapa hari hingga beberapa minggu. Larva *parasitoid* secara perlahan menggerogoti inang dari dalam hingga inang mati. Selain kuat dan lentur untuk menembus jaringan, *ovipositor* juga berfungsi mendeteksi inang melalui getaran atau sinyal kimia, memastikan penempatan telur yang presisi untuk keberhasilan perkembangan parasitoid.



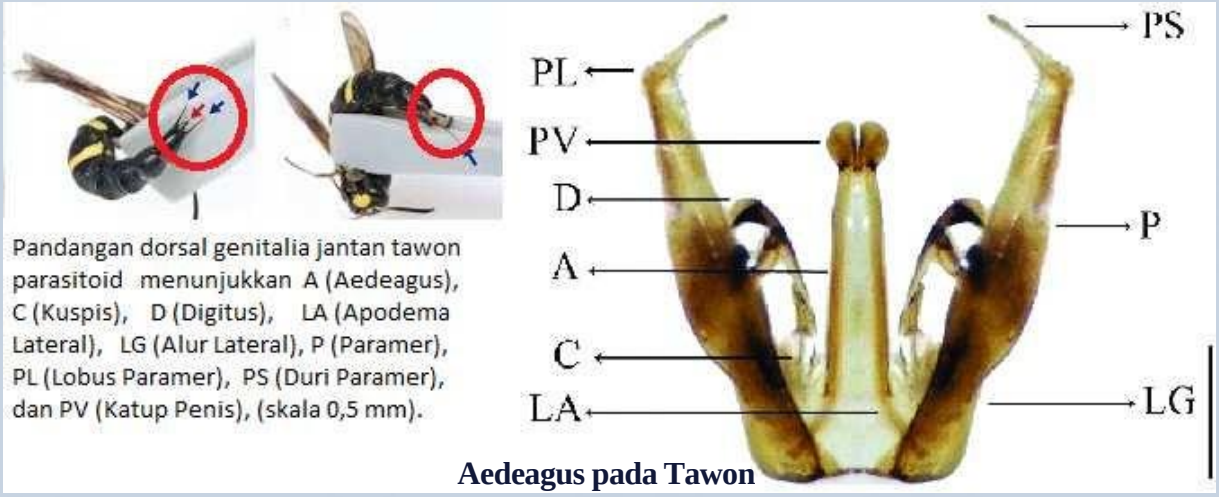
Larva Tawon *Diadegma semiclausum* sebagai parasit pada *Plutella xylostella*
(Sumber : Kasparyan & Khalaim, 2021

Pada tawon Ichneumonidae jantan, aedeagus adalah organ kopulasi eksternal yang berfungsi sebagai alat penyalur sperma selama kawin. Struktur ini merupakan bagian dari genitalia jantan, terletak di ujung posterior abdomen. Meskipun bentuknya dapat bervariasi antarspesies, umumnya *aedeagus* terdiri dari *sclerite-sclerite* kompleks yang beradaptasi untuk penguncian (*locking*) dengan organ reproduksi betina. Morfologi aedeagus seringkali menjadi karakter penting dalam *taksonomi Ichneumonidae* untuk membedakan spesies jantan yang sangat mirip.



***Pimpla pedalis* Tawon Icheumonidae Betina (Kiri ada Ovipositor) dan Jantan (Kanan ada Aedeagus)**

(Sumber : BugGuideNet;WIkipedia)



Aedeagus pada Tawon

(Sumber : Kaplan, 2022)

Tawon *Ichneumonidae* jantan dan betina menunjukkan perbedaan morfologi yang jelas, terutama pada bagian posterior abdomen. Betina memiliki *ovipositor* yang menonjol dan digunakan untuk meletakkan telur, sementara jantan memiliki struktur genitalia internal yang puncaknya adalah aedeagus. *Aedeagus* merupakan organ kopulasi utama pada tawon jantan, berperan dalam penyaluran sperma kepada betina selama perkawinan untuk membuahi telur. Berbeda dengan famili lain seperti *Vespidae* dan *Apidae*,

tawon *Ichneumonidae* jantan tidak memiliki sengat dan tidak menghasilkan racun. Fungsi utama aedeagus murni untuk reproduksi, memastikan transfer materi genetik untuk generasi berikutnya.

f. Pewarnaan Tubuh dan Pola Warna

Sebagian besar spesies *Ichneumonidae* memiliki warna dominan gelap, seperti hitam atau coklat, namun sering disertai corak kuning, jingga, atau merah pada bagian tubuh tertentu. Warna-warna mencolok ini diduga merupakan bentuk mimikri *Batesian* atau *Müllerian* yang bertujuan meniru serangga beracun guna menghindari predator. Selain itu, pola pewarnaan ini juga berfungsi sebagai sinyal peringatan (*aposematisme*).

g. Adaptasi Tambahan

Spesies-spesies tertentu memiliki bentuk tubuh yang disesuaikan dengan lingkungan tempat hidup dan jenis inang yang digunakan. Misalnya, tawon yang berkembang di lingkungan bawah tanah biasanya memiliki tubuh lebih kokoh dan pendek, sementara yang hidup di permukaan daun atau batang cenderung memiliki tubuh lebih panjang dan gesit, memudahkan mobilitas di ruang terbuka.

h. Siklus Hidup dan Mekanisme Parasitisme

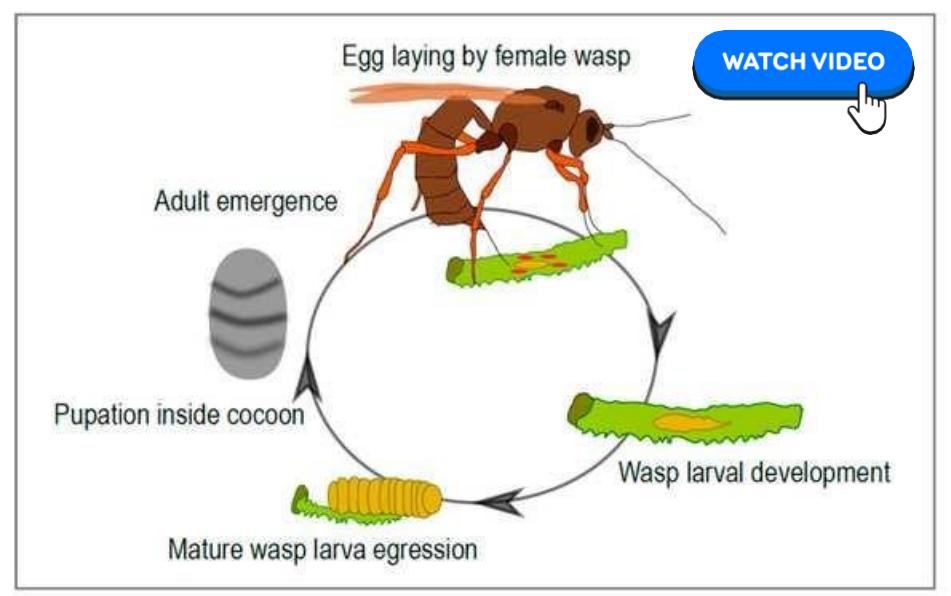
Tawon famili *Ichneumonidae* dikenal sebagai *parasitoid soliter* atau *gregarius*, yang siklus hidupnya sangat tergantung pada keberadaan inang. Siklus ini secara efisien mengikuti tahapan kunci: dimulai dengan aktivitas tawon betina dewasa (*Adult female wasp*) yang mencari inang. Tawon dewasa ini biasanya berwarna gelap (hitam, cokelat) dengan corak kuning, oranye, atau merah pada kaki, antena, atau abdomen, memiliki panjang tubuh bervariasi dari 2 hingga 20 mm atau lebih. Mereka aktif mencari makan nektar atau cairan lain untuk energi, dan secara simultan mencari inang untuk reproduksi.

Mekanisme parasitisme dimulai ketika tawon betina dewasa mendeteksi inang yang sesuai, seringkali larva serangga herbivora, melalui kombinasi sinyal kimia (feromon inang atau bau tanaman yang rusak oleh inang) dan getaran. Setelah inang ditemukan, betina menggunakan ovipositornya yang panjang dan ramping untuk melakukan peletakan telur oleh tawon betina (*Egg laying by female wasp*) di dalam atau pada tubuh inang. Contoh inang meliputi larva Lepidoptera seperti ulat grayak (*Spodoptera litura*), ulat kubis *(Plutella*

xylostella), dan ulat penggerek batang padi *(Scirpophaga incertulas)*; larva *Hymenoptera* seperti larva tawon gergaji *(Neodiprion sertifer)*; atau bahkan pupa *Coleoptera* seperti kumbang tanduk *(Oryctes rhinoceros)*.

Telur yang berukuran sangat kecil (kurang dari 1 mm), biasanya berbentuk oval dan berwarna putih transparan, akan menetas menjadi perkembangan larva tawon *(Wasp larval development)* di dalam tubuh inang. Larva parasitoid ini, yang umumnya berwarna putih krem, berbentuk silindris atau fusiform, dan memiliki segmen-segmen tubuh yang jelas, akan berkembang biak di dalam atau pada inang *(endoparasit/ektoparasit)*, secara perlahan mengonsumsi jaringan non-vital inang hingga inang mati. Fase larva ini bisa berlangsung beberapa hari hingga beberapa minggu (misalnya, 7-14 hari untuk banyak spesies *parasitoid Plutella xylostella*), bergantung pada spesies Ichneumonidae, jenis inang, dan kondisi lingkungan. Sebelum inang benar-benar mati, larva parasitoid seringkali telah mencapai fase instar terakhirnya dan melakukan keluar larva tawon dewasa (*Mature wasp larva egress*) dari tubuh inang.

Selanjutnya, larva memasuki fase pupasi di dalam kokon (*Pupation inside cocoon*). Pupa Ichneumonidae seringkali terbungkus dalam kokon sutra yang ditenun oleh larva, berbentuk oval atau memanjang, dengan warna bervariasi dari putih kekuningan hingga cokelat gelap. Kokon ini dapat ditemukan menempel pada daun, di dalam tanah, atau pada sisa-sisa inang. Durasi fase pupa ini juga bervariasi, biasanya 1-3 minggu, sebelum kemunculan dewasa *(Adult emergence)* individu dewasa yang baru dengan memotong ujung kokon, mengakhiri siklus hidup dan siap untuk memulai kembali pencarian inang.



(Sumber : Volkoff & Cusson, 2020)

G. KEGIATAN PEMBELAJARAN

Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……

Kelompok : ……..……..

Jawablah pertanyaan berikut dengan singkat dan uraikan secara lengkap format doc/pdf

1. Penentuan Pertanyaan Mendasar

a. Mengapa tawon *Ichneumonidae* menjadi objek studi yang relevan dalam pengelolaan hama pertanian, khususnya hama *Plutella xylostella*? Jelaskan mengapa pertanyaan ini penting untuk diinvestigasi secara mendalam dan bagaimana spesimen digital *AR* dapat membantu Anda memahami pertanyaan tersebut.

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

b. Bagaimana karakteristik parasitisme pada tawon Ichneumonidae dapat membantu petani dalam mengendalikan hama secara efektif, sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan dan mengurangi penggunaan pestisida kimia?

2. Mendesain Perencanaan Proyek

c. Jelaskan bagaimana Anda menyusun rencana observasi untuk mengamati perilaku tawon *Ichneumonidae* dalam mencari inang. Apa saja alat dan bahan yang Anda perlukan (termasuk penggunaan spesimen digital *AR* dan *E-worksheet)*, dan bagaimana Anda membagi tugas dalam kelompok Anda?

d. Dalam merancang protokol, bagaimana Anda memastikan bahwa Anda dapat mengintegrasikan data dari spesimen digital *AR* dengan data dari observasi lapangan (jika ada) untuk menghasilkan analisis yang komprehensif?

3. Menyusun Jadwal

e. Bagaimana Anda dan pendidik menetapkan lini masa untuk menyelesaikan proyek ini, mulai dari identifikasi morfologi hingga presentasi rekomendasi? Mengapa setiap tahapan memiliki batas waktu yang ketat, dan bagaimana Anda mengatur prioritas untuk memastikan proyek selesai tepat waktu?

f. Jika di tengah pengerjaan proyek Anda menemukan informasi baru yang tidak sesuai dengan rencana awal, bagaimana Anda melakukan penyesuaian jadwal dan metode kerja secara kolaboratif dengan pendidik?

4. Memonitor Kemajuan Proyek *(Monitor The Students And The Progress Of The Project)*

g. Bagaimana Anda memanfaatkan peran pendidik sebagai mentor untuk membantu Anda dalam mengidentifikasi karakteristik morfologi kunci tawon Ichneumonidae menggunakan spesimen digital *AR*? Berikan contoh spesifik bagaimana bimbingan tersebut memengaruhi proses identifikasi Anda.

h. Jelaskan bagaimana *e-worksheet AR* berfungsi sebagai alat monitoring bagi Anda dan pendidik. Bagaimana fitur anotasi di dalamnya membantu merekam dan melacak kemajuan proyek, serta memberikan umpan balik yang efektif?

5. Mengevaluasi Pengalaman

i. Lakukan refleksi terhadap seluruh pengalaman Anda. Apa tantangan terbesar yang Anda hadapi saat merancang protokol observasi, dan bagaimana Anda mengatasinya? Apa pembelajaran terpenting yang Anda dapatkan tentang parasitisme serangga?

j. Dari diskusi refleksi bersama pendidik dan teman sekelompok, temuan baru apa yang muncul mengenai efektivitas tawon *Ichneumonidae*? Bagaimana pengalaman *PjBL* ini mengubah cara pandang Anda terhadap pengendalian hama terpadu (PHT)?

H. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses *post-test* secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,





I. GLOSARIUM

- Antena filiform : Antena berbentuk seperti benang yang beruas-ruas, sangat peka terhadap sinyal kimia seperti feromon atau bau inang.
- Agen pengendalian hayati : Organisme yang digunakan dalam pertanian untuk mengendalikan populasi hama secara alami, menggantikan peran pestisida.
- Feromon : Zat kimia yang dilepaskan organisme sebagai sinyal komunikasi, misalnya untuk mendeteksi lokasi inang.
- Holometabola : Kelompok serangga yang mengalami metamorfosis sempurna: telur → larva → pupa → dewasa.
- Hymenoptera : Ordo serangga yang mencakup tawon, lebah, dan semut.
- Ichneumonidae : Famili tawon parasitoid yang sangat beragam dan dikenal efektif dalam pengendalian populasi serangga hama.
- Imago : Fase akhir dalam siklus hidup serangga, yaitu bentuk dewasa yang telah sempurna.
- Inang : Organisme (seperti ulat) yang menjadi tempat berkembangnya larva parasitoid.
- Keanekaragaman hayati : Jumlah dan variasi makhluk hidup dalam suatu ekosistem, penting untuk stabilitas lingkungan.
- Larva : Bentuk muda serangga setelah menetas dari telur, biasanya aktif makan sebelum menjadi pupa pada kelompok holometabola
- Lepidoptera : Ordo serangga yang mencakup kupu-kupu dan ngengat; larvanya sering menjadi sasaran tawon parasitoid.
- Mimikri : Adaptasi visual atau bentuk yang membuat organisme menyerupai organisme lain untuk melindungi diri dari predator.
- Oviposisi : Proses peletakan telur oleh serangga betina; bisa di dalam (internal) atau di luar tubuh inang (eksternal).
- Ovipositor : Organ panjang seperti jarum di bagian belakang tubuh tawon betina, digunakan untuk menyuntikkan telur ke inang.
- Parasitoid : Organisme yang berkembang di tubuh inang dan akan membunuh inangnya pada akhir siklus hidup.
- Parasitisme : Hubungan antarorganisme di mana satu pihak (parasit atau parasitoid) mendapat keuntungan dan merugikan pihak lain (inang).
- Polydnaviridae : Famili virus yang hidup bersimbiosis dengan tawon parasitoid dan membantu menekan sistem imun inang.
- Regulator populasi serangga : Organisme seperti tawon parasitoid yang membantu menstabilkan jumlah serangga lain dalam ekosistem.
- Spesifisitas inang : Kemampuan parasitoid untuk hanya menyerang jenis inang tertentu, membuat mereka sangat selektif dan efektif.

Entomologi Terapan

J. REFERENSI

- Eggs, B., Birkhold, A. I., Röhrle, O., & Betz, O. (2018). *Structure and function of the musculoskeletal ovipositor system of an ichneumonid wasp.* BMC Zoology, 3(1), 12.
- Kaplan, E. (2022). *The first illustrations of male external genitalia of sixty species belonging to digger wasps (Hymenoptera: Apoidea).* Oriental Insects, 56(4), 463-488.
- Kasparyan, D. R., & Khalaim, A. I. (2021). *New Darwin wasps (Hymenoptera, Ichneumonidae, Tersilochinae, Tryphoninae) from the Eastern Palaearctic region.* Journal of Hymenoptera Research, 84, 115-126.
- Marchiori, C. H. (2022). *Study of the bionomy of the Ichneumonidae Family (Insecta: Hymenoptera).* Open Access Research Journal of Biology and Pharmacy, 4(1), 007-029.
- Quicke, D. L. J. (2015). *The braconid and ichneumonid parasitoid wasps: Biology, systematics, evolution and ecology.* John
- Vinson, S. B. (1998). *The General Host Selection Behavior of Parasitoid Hymenoptera and a Comparison of Initial Strategies Utilized by Egg-Larval, Larval and Pupal Parasitoids.* Biological Control, 11(2), 79-96.
- Strand, M. R., & Burke, G. R. (2020). *Polydnaviruses.* Current Biology, 30(17), R1015-R1020.
- Volkoff, A. N., & Cusson, M. (2020). *The unconventional viruses of ichneumonid parasitoid wasps.* Viruses, 12(10), 1170.
- Wiley & Sons. Shaw, M. R., & Askew, R. R. (2022). *Host relationships of European Ichneumonidae (Hymenoptera).* Journal of Natural History, 56(1-4), 1-218.

Entomologi Terapan

E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB IX

<Strategi Pertahanan Serangga=

Serangga : Kumbang bombardir *(Brachinus* sp*)*



A. PETUNJUK E-WORKSHEET

E-worksheet ini dirancang untuk membantumu memahami "<Strategi Pertahanan Serangga=". Ikuti langkah-langkah berikut untuk menggunakan *E-worksheet* ini dengan optimal:

1. Sebelum memulai pengerjaan *E-worksheet* ini, peserta didik diwajibkan untuk menyelesaikan *pretest* terlebih dahulu. *Pretest* ini bertujuan untuk mengukur tingkat pemahaman awal peserta didik terhadap materi yang akan dipelajari. Hasil pretest akan menjadi salah satu indikator dalam penilaian capaian pembelajaran mata kuliah.
2. Baca Tujuan Pembelajaran Pahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran yang tercantum di bagian awal *E-worksheet*. Tujuan ini akan menjadi acuan kompetensi yang perlu anda capai setelah menyelesaikan kegiatan.
3. Bacalah materi singkat yang disajikan dalam bentuk teks, gambar, atau video. Fokuslah pada konsep <Strategi Pertahanan Serangga=.
3. Tonton Simulasi *AR*/Video Interaktif dengan klik link akses video/simulasi *AR* yang telah disediakan. Amati morfologi maupun alur interaksi serangga dengan lingkungan/serangga lainnya). Setelah itu catat informasi penting yang anda temukan untuk membantu menjawab pertanyaan selanjutnya.
4. Kerjakan Soal, jawablah pertanyaan-pertanyaan yang tersedia di Kegiatan Pembelajaran berdasarkan pemahamanmu terhadap materi dan video.
5. Diskusikan hasilmu dengan teman atau guru jika diperlukan. Anda juga bisa membandingkan jawabanmu dengan sumber ilmiah untuk memperkuat pemahaman. Uraikan kedalam format *doc/pdf.*
6. Evaluasi Diri Di akhir *E-worksheet* terdapat bagian *Posttest*. Gunakan bagian ini untuk menilai sejauh mana anda memahami materi yang telah dipelajari.

B. PRETEST (INDIVIDUAL)

Sebelum memulai kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti pretest singkat yang akan berlangsung selama 45 menit. *Pretest* ini brtujuan untuk mengukur pemahaman awal Anda mengenai materi yang akan kita pelajari. Anda dapat mengakses *pretest* secara luring maupun daring dengan memindai bercode berikut ini, mengklik tautan/link berikut ini. Terima kasih atas kerja sama dan pasrtisipannya.

SCAN HERE

Link (tautan) *Pretest*

CLICK HERE

C. TOPIK DAN CAPAIAN PEMBELAJARAN

Topik : Strategi Pertahanan Serangga - Kumbang bombardir (Brachinus sp).
Capaian Pembelajaran :

1. Peserta didik mampu mengidentifikasi ciri morfologi, habitat, dan senyawa kimia yang digunakan oleh kumbang bombardier dalam mekanisme pertahanannya.
2. Peserta didik mampu menjelaskan tahapan proses pertahanan kimiawi pada kumbang bombardier secara runtut dan dengan bahasa yang mudah dipahami.
3. Peserta didik mampu menggunakan informasi dari spesimen *AR* dan berbagai sumber untuk menyusun deskripsi ilmiah tentang mekanisme pertahanan kumbang bombardier dalam konteks ekologi dan adaptasi serangga.
4. Peserta didik mampu menganalisis kelebihan dan kekurangan mekanisme pertahanan kumbang bombardier dibandingkan dengan serangga lain yang memiliki strategi pertahanan berbeda.
5. Peserta didik mampu menganalisis kelebihan dan kekurangan mekanisme pertahanan kumbang bombardier dibandingkan dengan serangga lain yang memiliki strategi pertahanan berbeda.
6. Peserta didik mampu mengevaluasi efektivitas mekanisme pertahanan kimiawi kumbang bombardier terhadap predator dan dampaknya terhadap kelangsungan hidup spesies tersebut.
7. Peserta didik mampu merancang dan membuat proyek kreatif berupa poster digital, infografis, atau video pendek yang menjelaskan mekanisme pertahanan kumbang bombardier serta efektivitasnya sebagai bentuk presentasi hasil proyek pembelajaran

Alat dan Bahan :

- PC atau laptop atau Gawai
- Jaringan Internet
- *Augmented reality*
- Foto atau video pendukung
- Referensi ilmiah

Model Pembelajaran : *Project Based Learning*

Metode Pembelajaran :

- Simulasi
- Eksplorasi
- Diskusi Kelompok
- Tanya Jawab
- Refleksi

D. MATERI

1. Pengertian Mekanisme Pertahanan Serangga Secara Alami

Mekanisme serangga secara alami merujuk pada kemampuan serangga untuk bertahan hidup, beradaptasi, dan menjaga kelangsungan populasinya di dalam ekosistem melalui interaksi dengan faktor lingkungan tanpa campur tangan manusia. Mekanisme ini melibatkan proses alami seperti kemampuan reproduksi tinggi, daya survival, strategi pertahanan seperti mimikri dan Kamuflase, serta interaksi ekologis sebagai polinator, dekomposer, predator, atau parasitoid.

Menurut Pramudi et al. (2022), ekologi serangga mempelajari kehidupan serangga dalam komunitas dan interaksinya dengan lingkungan biotik dan abiotik, termasuk kemampuan beradaptasi, mencari makan, mempertahankan diri dari predator, serta menjaga keseimbangan populasi dengan proses alami seperti natalitas, mortalitas, imigrasi, dan emigrasi. Serangga juga menunjukkan kepekaan terhadap perubahan lingkungan yang membuatnya dapat dijadikan indikator kualitas habitat, di mana komunitas serangga tertentu akan merespons secara spesifik terhadap gangguan lingkungan (Taradipha et al., 2019). Misalnya, spesies seperti Digitonthopagus sp. dan Papilio sp. digunakan sebagai indikator lingkungan dengan gangguan rendah.

Selain itu, dalam konteks pertanian, Soesanthy dan Trisawa (2011) menjelaskan bahwa mekanisme alami dalam pengelolaan populasi serangga hama mencakup pemanfaatan musuh alami (seperti parasitoid dan predator), serta teknik manipulasi ekosistem agar mendukung populasi penyerbuk dan musuh alami untuk menjaga keseimbangan populasi serangga.

2. Klasifikasi Mekanisme Pertahanan

a. Klasifikasi Mekanisme Pertahanan Primer

Kamuflase, atau camouflage, merupakan strategi adaptif yang umum dan fundamental dalam dunia serangga untuk menghindari deteksi oleh predator maupun mangsa. Salah satu bentuk Kamuflase yang paling penting dalam ekologi adalah crypsis, yaitu kemampuan serangga untuk menyatu dengan lingkungannya. Mekanisme ini melibatkan penyesuaian morfologi, warna, pola, dan terkadang perilaku agar serangga sulit dibedakan dari latar belakangnya. Tujuan utamanya adalah mengurangi kontras visual maupun sensorik, sehingga predator kesulitan menemukan mangsanya, atau sebaliknya predator serangga dapat mendekati mangsanya tanpa terdeteksi.

Secara ilmiah, crypsis dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama berdasarkan prinsip adaptasi yang terlibat:

1. Kamuflase Kriptik (Crypsis Homokromatik dan Homomorfik)

Bentuk crypsis yang paling dikenal, di mana serangga menyerupai lingkungan sekitarnya baik dari segi warna (homochromy) maupun bentuk (homomorphy).

a) Homokromatik

Serangga memiliki warna yang identik atau sangat mirip dengan substrat tempat mereka biasa ditemukan. Contoh klasik adalah Phasmida (belalang daun dan belalang ranting) yang menunjukkan warna hijau daun atau cokelat ranting, sering kali dilengkapi dengan tekstur yang menyerupai permukaan daun atau kulit kayu.



Kamuflase Kriptik Homokromatik Belalang Daun (*Valanga nigricornis)*

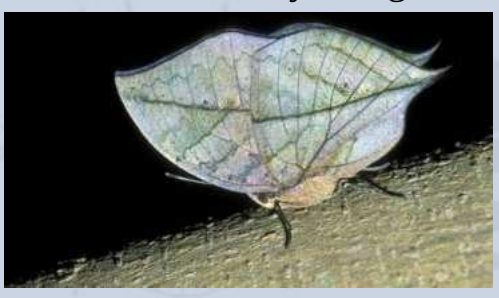
(Sumber : Bali WIldlife)

- Perubahan Warna Fisiologis: Beberapa serangga, seperti larva *Sphingidae* (*ngengat hornworm*) atau beberapa spesies *Acrididae* (belalang), memiliki kemampuan untuk mengubah warna pigmen kutikulanya secara perlahan sesuai dengan warna tumbuhan inang atau tanah tempat mereka berada. Perubahan ini seringkali dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembaban, suhu, dan intensitas cahaya.
- Pola Disrupsi Warna *(Countershading)*: Meskipun tidak selalu merupakan *homokromatik* murni, *countershading* adalah bentuk *crypsis* di mana bagian dorsal tubuh lebih gelap dan bagian ventral lebih terang. Ketika cahaya datang dari atas, bagian dorsal yang gelap menyerap lebih banyak cahaya, sementara bagian ventral yang terang memantulkan cahaya. Ini secara efektif menghilangkan efek bayangan yang biasanya akan menonjolkan bentuk tiga dimensi serangga, membuatnya tampak lebih datar dan menyatu dengan latar belakang.

b) *Homomorfik*

Serangga mengembangkan bentuk tubuh, tonjolan, atau apendiks yang secara visual meniru objek-objek non-hidup di lingkungan.

- Mimikri Batang/Ranting: Larva *Geometridae* (ngengat pengukur), atau "*loopers*," seringkali menyerupai ranting atau tunas kecil dengan postur tubuh yang kaku dan tegak, terutama saat terganggu.
- Mimikri Daun Kering/Gugur: Beberapa spesies Lepidoptera dewasa, seperti ngengat genus Kallima (ngengat daun mati), memiliki sayap yang jika dilipat, secara sempurna meniru daun kering dengan urat daun dan bahkan bercak jamur atau kerusakan.
- Mimikri Lumut/Lichen: Beberapa serangga bersayap seperti *ngengat Catocala* atau beberapa spesies Tettigoniidae (belalang sembah) memiliki pola dan warna yang meniru lumut atau lumut kerak pada batang pohon, memungkinkan mereka untuk bersembunyi dengan efektif.



Kamuflase Kriptik Homomorfik Ngengat Daun Mati inacus (Kallima
(Sumber : Wikipedia)

2. Kamuflase Bentuk Disrupsi (*Disruptive Coloration*)

Strategi ini melibatkan penggunaan pola warna yang kontras tinggi dan tidak beraturan pada tubuh serangga, yang berfungsi untuk memecah atau mengaburkan garis besar tubuh serangga. Pola-pola ini mencegah predator dari mengidentifikasi bentuk "serangga" yang utuh. Garis atau bercak gelap dan terang yang tidak selaras dengan kontur tubuh dapat mengganggu persepsi visual predator, sehingga sulit untuk membedakan antara serangga dan latar belakangnya. Contohnya dapat ditemukan pada beberapa spesies belalang *Acrididae* atau ngengat Noctuidae yang memiliki pola garis-garis patah atau bercak-bercak besar yang menyatu dengan bayangan dan cahaya di habitatnya. Ngengat noctuid menampilkan Kamuflase disrupsi yang efektif melalui pola zigzag atau bercak kontras pada sayap depan. Ketika sayap dilipat di atas kulit kayu atau lumut, pola ini secara visual memutus garis tepi tubuh, sehingga predator kesulitan membedakan ngengat dari lingkungannya karena dukungan efek cahaya dan bayangan



Kamuflase Disrupsi Ngengat Noctuidae Menyerupai Kulit Batang Pohon
(Sumber : Wikipedia)

3. Kamuflase Transparansi/Translucensi

Beberapa serangga, terutama yang berukuran kecil atau hidup di lingkungan akuatik, menunjukkan tingkat transparansi pada kutikula atau bagian tubuh tertentu. Strategi ini mengurangi visibilitas karena cahaya dapat menembus tubuh, membuatnya tampak kurang buram dan sulit dikenali. Contoh klasik adalah larva nyamuk Chaoborus (phantom midge) yang hampir sepenuhnya transparan di kolom air, kupu-kupu sayap kaca Greta oto (Lepidoptera) dengan sayap transparan, serta sayap bening pada banyak spesies Odonata (capung).



Kamuflase Translusensi larva nyamuk Chaoborus
(Sumber : Flickr Jam Hamrsky)

4. Mimikri Agresif (Aggressive Mimicry)

Berbeda dari crypsis, mimikri agresif adalah strategi di mana predator menyamar agar mangsanya tidak curiga dan mendekat dengan sendirinya. Predator dapat menyerupai bagian dari lingkungan atau bahkan organisme yang tampak tidak berbahaya. Contoh klasik adalah:

- Belalang Sembah (Mantodea): Banyak spesies belalang sembah memiliki warna dan bentuk mirip bunga atau daun. *Hymenopus coronatus* (belalang anggrek) merupakan contoh terkenal, karena bentuk dan warnanya menyerupai kelopak bunga anggrek, sehingga mangsa seperti lebah atau kupu-kupu tertarik mendekat.
- Laba-laba Kepiting (Thomisidae): Walaupun bukan serangga, laba-laba ini sering menyamar di kelopak bunga dengan warna menyerupai bunga tersebut, lalu menyergap serangga penyerbuk yang hinggap.



Agresif Mimikri Mantis Anggrek *Hymenopus coronatus (Orchid Mantis)*
(Sumber : Wikipedia)

C. *Aposematisme*

Aposematisme adalah strategi adaptif pada serangga yang menampilkan sinyal peringatan mencolok—umumnya berupa warna cerah dan pola kontras, untuk memberi tahu predator bahwa mereka berbahaya, beracun, atau tidak enak dimakan. Warna-warna mencolok, terutama merah, oranye, kuning dengan kombinasi hitam, berfungsi sebagai peringatan visual yang efektif, seolah-olah mengiklankan <jangan makan saya.=

Konsep ini berakar pada pembelajaran asosiatif: ketika predator mencoba memangsa serangga aposematik, pengalaman negatif seperti rasa pahit, muntah, atau sengatan akan dikaitkan dengan penampilan visual (atau kadang auditori/olfaktori) yang khas. Akibatnya, predator akan belajar menghindari organisme dengan pola serupa di masa depan. Mekanisme ini mencerminkan proses ko-evolusi antara predator dan mangsa.

Contoh kasus adalah beberapa serangga pengisap getah, seperti kutu daun tertentu atau *Oncopeltus fasciatus* (milkweed bug), yang memiliki pola merah- hitam mencolok. Mereka memperoleh toksin dari tumbuhan inang sehingga menjadi tidak enak atau beracun bagi predator.



Aposematisme oleh Oncopeltus fasciatus

(Sumber : My Monarch Guide)

b. Klasifikasi Mekanisme Pertahanan Sekunder

1. Mengeluarkan Suara

Secara keseluruhan suara dari serangga berfungsi dalam konteks mencari pasangan dan pertahanan territorial. Beberapa jenis serangga juga menghasilkan suara yang berbeda-beda saat diserang ataupun sedang menyerang. Bura et al., (2016) menjelaskan bahwa perbedaan suara yang dihasilkan ditujukan untuk peringatan bahaya, pertahanan dan untuk bisa

mengejutkan atau menakuti predator. Dalam adaptasi perilaku dengan membuat suara, serangga biasanya menghasilkan bunyi seperti mendengung, mendesis atau mengeluarkan suara parau seperti rautan yang tujuannya untuk mengganggu atau membingungkan predator. *Gryllus bimaculatus* (jangkrik lapangan) juga menghasilkan suara stridulasi keras sebagai respons terhadap ancaman (*rivalry song*) selain untuk menarik betina (Lin & Hedwig, 2021). Suara ini bisa menjadi upaya untuk mengejutkan atau menakut-nakuti predator.



G*ryllus bimaculatus* (jangkrik lapangan) Bersuara sebagai Respon Ancaman
(Sumber : Lin & Hedwig, 2021)

2. Pertahanan Kimiawi

Perilaku adaptasi dan perlindungan diri serangga lainnya adalah dengan cara memproduksi bahan atau zat kimia. Seringkali zat kimia yang dihasilkan oleh serangga bersifat racun dan dapat menghalangi organisme lain menyerang serangga. Zat pertahanan ini dapat berfungsi untuk menjauhkan serangga lainnya ataupun untuk melumpuhkan musuh atau predator dengan cara serangga menyemprotkan, meludah, menyengat, menggigit atau melakukan kontak untuk mengoleskan zat tersebut pada musuh. Beberapa serangga yang menghasilkan zat pertahanan dilaporkan dapat lolos dari sistem pencernaan predator bahkan setelah ditelan salah satunya adalah kumbang pengebom atau yang dikenal sebagai "*Bombardier Beetle*" (*Pheropsophus jessoensis*) dapat lolos dari serangan dua spesies katak (*Bufo japonicus*) dan (*Bufo torrenticola*).

3. *Thanatosis*

Thanatosis adalah fenomena umum yang ditemukan pada serangga, di mana mangsa tampak berpura-pura mati saat diserang oleh predator sehingga predator tidak tertarik lagi untuk mengkonsumsi mangsa karena kecenderungan predator untuk menghindari mangsa yang telah mati atau bangkai.

Perilaku pura-pura mati (*Thanatosis*) atau bisa juga dikenal dengan istilah t*onic immobility* (*TI*) dan sering kali terjadi diikuti kontak fisik mangsa dan predatornya (Humphreys dan Ruxton, 2018). Bentuk-bentuk thanatosis yang kerap kali ditemukan adalah berupa katalepsi, postur kaku yang dipertahankan dengan aktivitas otot tonik serangga. Pada periode ini serangga tidak menunjukkan adanya respon terhadap rangsangan eksternal padahal serangga tetap sadar sepenuhnya akan lingkungan. Belalang Ranting *Acrophylla wuelfingi* dari *ordo phasmida* biasanya mengandalkan Kamuflase untuk menghindari predator, tetapi jika terdeteksi, beberapa spesies akan terjatuh dan pura-pura mati. Mereka bisa tetap tidak bergerak dalam waktu yang cukup lama hingga predator pergi.



Acrophylla wuelfingi ordo phasmida
(Sumber : Shutterstock)

4. Pertahanan Fisik

Serangga juga dapat mengembangkan pertahanan fisik, seperti rambut dan duri di tubuh mereka. Beberapa larva lepidoptera telah mengembangkan bulu tubuh panjang untuk melindungi tubuhnya dari alat mulut predator dan serangan ovipositor parasitoid. Demikian pula duri mencolok yang terdapat pada larva capung dan semut berfungsi sebagai pertahanan fisik melawan predator. Selain itu, kerangka luar yang keras, seperti serangga dari ordo coleoptera atau serangga yang bersembunyi pada sarangnya/shelternya berfungsi sebagai penghalang fisik untuk menghalangi predator memangsa. Ukuran tubuh yang besar juga bisa menjadi keuntungan menghindari predator.

Entomologi Terapan

2. Profil Kumbang Bombardier

a. Klasifikasi Kumbang Bombardier

Menurut Diego (2021) klasifikasi *Brachinus* sp., adalah sebagai berikut :

Kingdom : Animalia
Phylum : Arthropoda
Class : Insecta
Ordo : Coleoptera
Family : Carabidae
Genus : Brachinus
Species : Brachinus sp.



Kumbang Bombardier (*Brachinus* sp.)
(Sumber : Scienceline)

Kumbang bombardier (*Brachinus* sp.) merupakan anggota family *Carabidae* yang dikenal luas karena kemampuan uniknya dalam mempertahankan diri dengan menyemprotkan cairan panas dan beracun dari bagian posterior tubuhnya. Mekanisme pertahanan ini melibatkan struktur khusus berupa nozzle yang memungkinkan semburan kimia diarahkan secara presisi terhadap predator. Salah satu spesies yang telah dikaji secara rinci untuk memahami struktur morfologis nozzlenya yang kompleks dan efisien dalam menghasilkan semburan tersebut (Armitage, 2004). Selain dikenal karena kemampuan bertahannya, *Brachinus* sp. juga berperan sebagai predator di ekosistemnya, yang menjadikannya penting dalam pengendalian populasi serangga lain.

b. Habitat dan Persebaran

Brachinus hidup di berbagai tipe habitat tergantung pada spesiesnya. Beberapa spesies ditemukan di daerah hutan batu kapur yang kering dan vegetasi dominan pinus, seperti *Brachinus fukienensis* dan *B. hubeiensis* di Tiongkok bagian timur dan barat (Hrdlicka, 2009). Spesies lain seperti B. turnai ditemukan di hutan primer yang lembab dengan dominasi pohon *Castanopsis chinensis* dan bambu di daerah pegunungan, menandakan kecenderungan beberapa spesies terhadap habitat relatif alami dan berhutan. Di sisi lain, di Uruguay *Brachinus sp*. ditemukan di sistem perairan intensif dengan dominasi

Entomologi Terapan

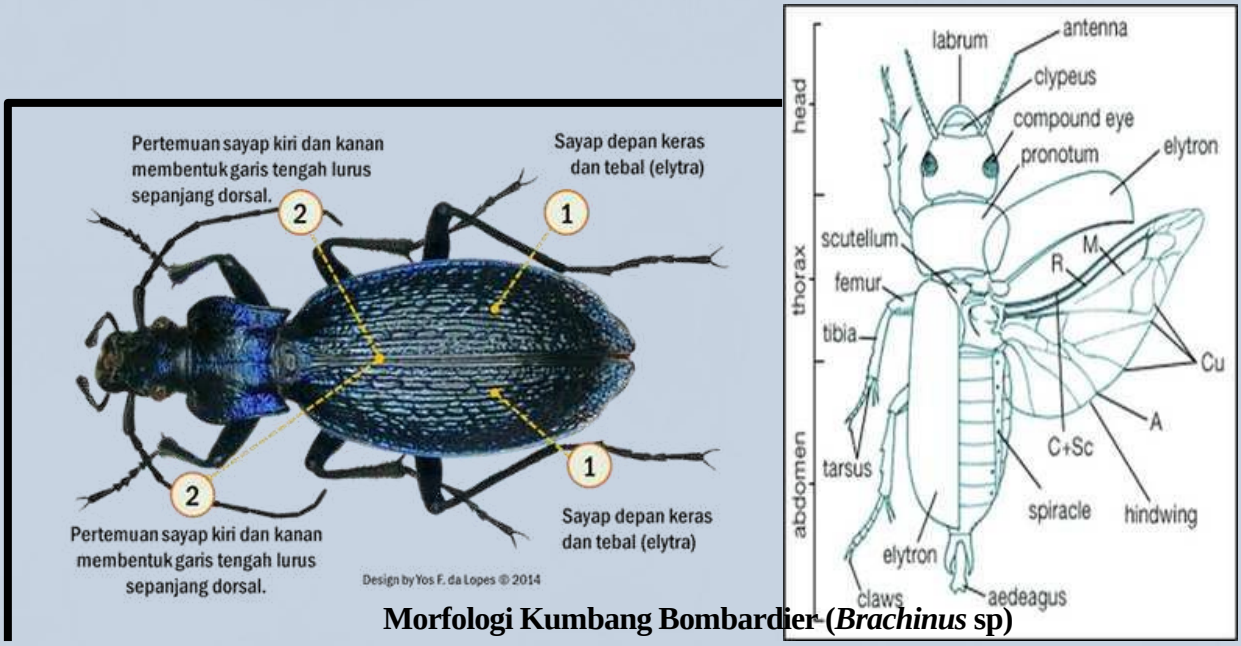
padang rumput dan pertanian musiman, yaitu menunjukkan toleransi beberapa spesies terhadap gangguan antropogenik (Castiglioni et al., 2017).

Secara geografis, genus *Brachinus* tersebar luas di berbagai wilayah dunia. Dalam kawasan Asia Tenggara dan Oriental, Hrdlicka (2009) mencatat ditemukannya berbagai spesies dari Cina (termasuk Provinsi Fujian dan Hubei), Vietnam, Laos, dan Indonesia. Persebaran ini mencakup daerah tropis dan subtropis dengan variasi kondisi ekologis. Menurut studi yang dilakukan oleh Castiglioni *et al*., (2017) di Uruguay, *Brachinus* sp. ditemukan juga di wilayah Amerika Selatan, khususnya Uruguay bagian timur, pada sistem pertanian intensif di kawasan lingkungan dengan intervensi manusia tinggi, khususnya di sistem pertanian - peternakan.

c. Morfologi Kumbang Bombardier

Kumbang bombardier memiliki morfologi unik yang memungkinkannya bertahan hidup dari predator dengan mekanisme pertahanan kimiawi yang canggih. Secara umum, tubuh serangga ini terbagi menjadi tiga segmen utama yang saling terhubung: kepala, toraks (dada), dan abdomen (perut). Berikut adalah rincian morfologi kumbang bombardier yang membedakannya dari serangga lain.

- Tubuh kumbang bombardier terbagi menjadi tiga bagian utama: kepala, thorax (dada), dan abdomen (perut), dengan panjang sekitar 13 mm pada spesies *Pheropsophus occipitalis*.



Morfologi Kumbang Bombardier (*Brachinus* sp)

(Sumber : Britanica)

- Kepala memiliki mata majemuk dan antena sebagai alat sensor utama. Mulut bertipe mengunyah dengan mandibula yang berkembang baik untuk menggigit dan mengunyah makanan.
- Thorax menopang tiga pasang kaki dan sepasang sayap depan yang keras (*elytra*) berfungsi sebagai pelindung sayap belakang yang tipis dan membranous. *Elytra* berwarna gelap dengan bercak jingga pada beberapa spesies.
- Memiliki enam kaki yang terdiri dari *coxa*, *trochanter*, *femur*, *tibia*, dan *tarsus* dengan cakar di ujung kaki, memungkinkan gerakan berjalan dan berlari efektif.
- Abdomen kumbang bombardir memiliki dua kelenjar di bagian pygidium yang menyimpan terpisah hidrogen peroksida dan hidrokuinon untuk mencegah reaksi prematur yang berbahaya. Saat diperlukan, kedua senyawa dialirkan ke dalam ruang reaksi (explosion chamber) yang dilapisi sel penghasil enzim katalase dan peroksidase. Di sinilah terjadi reaksi kimia eksotermik, menghasilkan p-benzoquinon dan semburan uap panas dengan suhu mendekati 100 °C, yang disemprotkan ke arah predator sebagai mekanisme pertahanan diri.

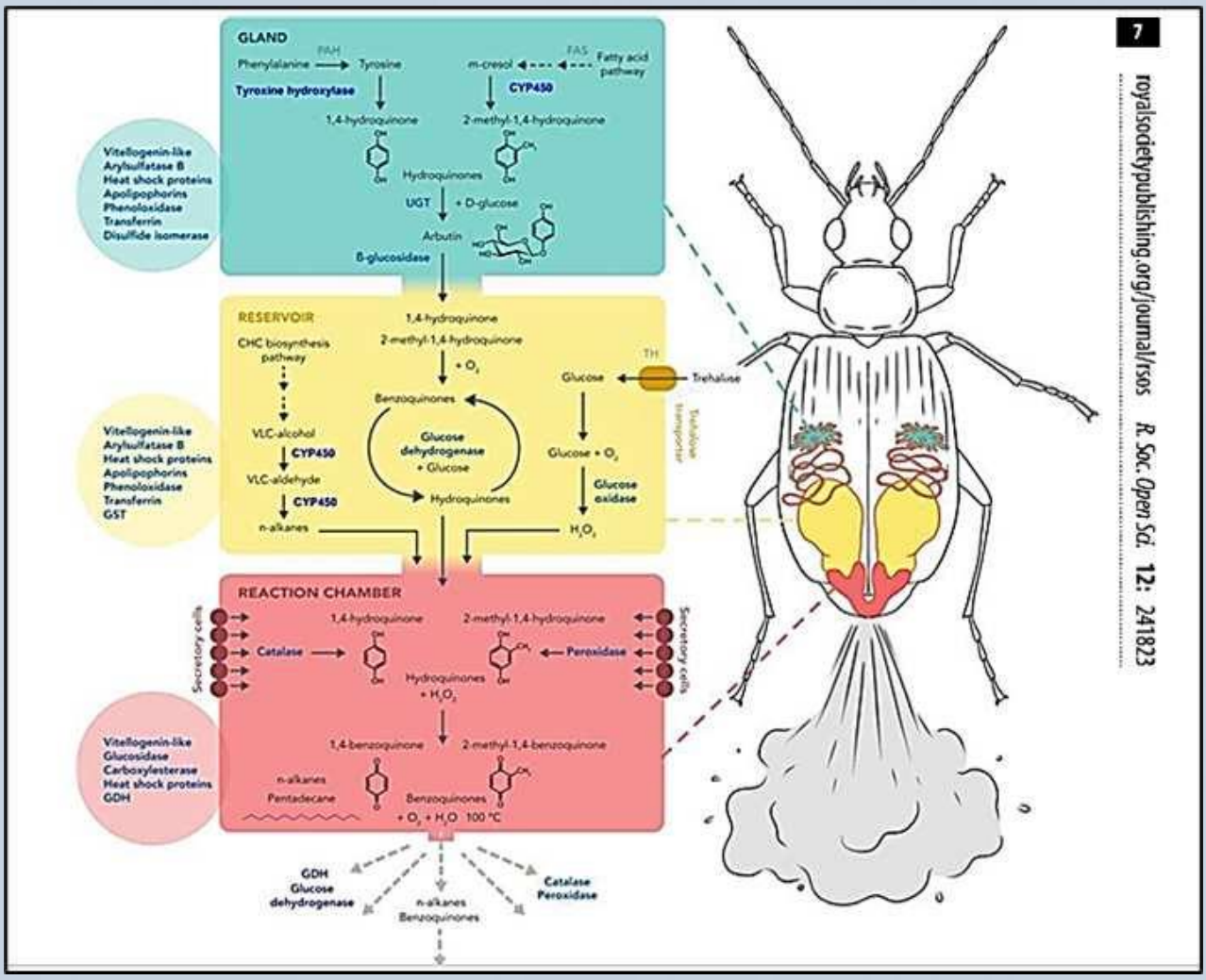
d. Perilaku Hidup dan Habitat Alami

Kumbang bombardier ditemukan di seluruh dunia, tersebar di berbagai benua seperti Eropa, Asia, Afrika, dan Amerika. Mereka cenderung hidup di habitat lembab seperti di bawah batu, kayu lapuk, atau dekat sumber air, di mana mereka dapat bersembunyi di siang hari. Mereka memakan serangga kecil sebagai mangsa utamanya.

Untuk bertahan hidup dari ancaman, kumbang ini memiliki mekanisme pertahanan yang unik. Saat merasa terancam, ia menyemburkan cairan kimia panas dan beracun dari bagian belakang tubuhnya untuk mengusir predator. Selain itu, kumbang bombardier juga mampu bertahan di dalam sistem pencernaan predator dengan melepaskan bahan kimia beracun, yang memaksa predator untuk memuntahkannya. Siklus hidupnya, yang meliputi fase telur, larva, pupa, hingga dewasa, terjadi pada musim hangat. Semua perilaku adaptif ini, mulai dari cara berburu hingga pertahanan diri, memungkinkan kumbang bombardier untuk bertahan di lingkungan yang penuh ancaman.

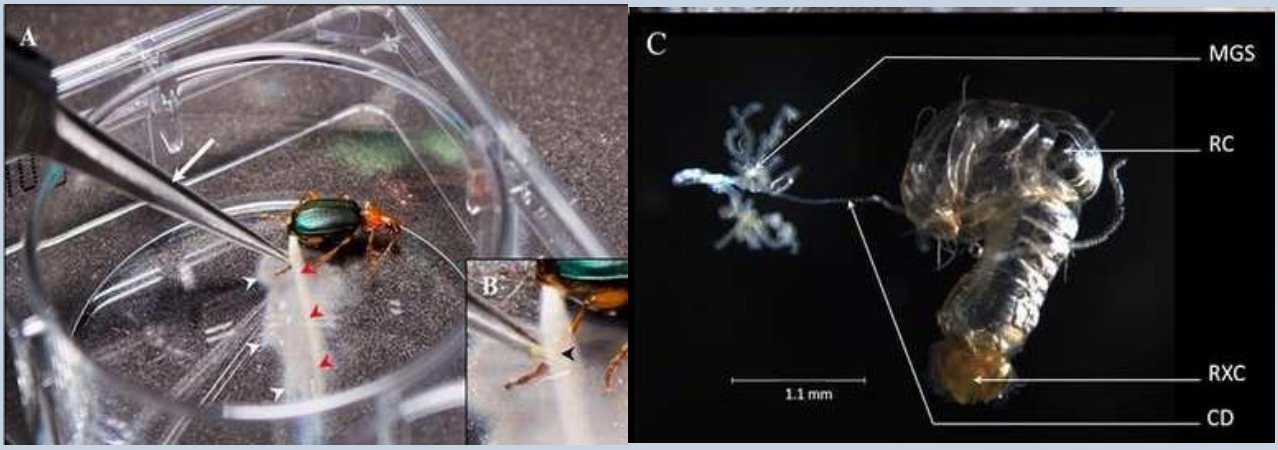
3. Mekanisme Pertahanan Kimiawi Kumbang Bombardier (*Bracinus sp*.)

Kumbang bombardier (*Brachinus sp*.) memiliki mekanisme pertahanan kimiawi yang sangat spesifik dan efisien. Senjata pertahanan ini terdiri dari dua kelenjar yang terletak di bagian *pygidium* (ujung abdomen). Kedua kelenjar ini menyimpan bahan kimia reaktan secara terpisah untuk mencegah reaksi yang tidak diinginkan. Kelenjar pertama berfungsi sebagai reservoir yang mengandung campuran hidrogen peroksida (H2O2) dan hidrokuinon (C6H6-O2
). Ketika kumbang merasa terancam, campuran bahan kimia dari reservoir disalurkan ke ruang reaksi, atau explosion chamber. Ruang ini memiliki dinding yang kaya akan enzim katalase dan peroksidase. Enzim-enzim ini berfungsi sebagai katalisator, memicu reaksi kimia eksotermik yang sangat cepat.



Dasar Molekuler Kelenjar Pertahanan Kumbang Bombardier
(Sumber : Vogel *et al.*, 2025)

Reaksi ini menghasilkan panas yang ekstrem, mencapai sekitar 100°C, dan tekanan tinggi akibat produksi gas dan uap air. Produk utama dari reaksi ini adalah p-benzokuinon (C6H4O2), sebuah senyawa beracun. Kombinasi panas dan tekanan ini menyebabkan campuran kimia beracun disemburkan keluar dari tubuh kumbang dalam bentuk semprotan berdenyut (*pulsed spray*), dengan frekuensi antara 300 hingga 1.000 kali per detik. Semburan ini dapat diarahkan secara tepat ke arah predator. Eksoskeleton kumbang bombardier telah berevolusi untuk tahan panas, melindungi tubuhnya dari efek membakar dari semburan tersebut. Mekanisme ini memungkinkan kumbang untuk secara efektif menetralkan ancaman tanpa membahayakan dirinya sendiri.



Kumbang Bombardier (*Brachinus crepitans)* menyemburkan cairan pertahanan dalam bentuk kabut halus (AB) dari Kelenjar Multi Lobus (C).
(Sumber : Vogel *et al.*, 2025)

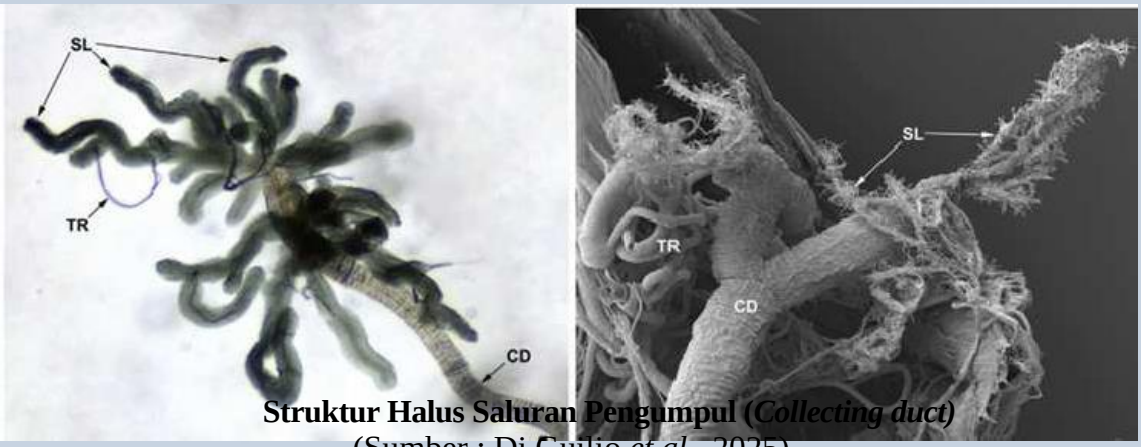


Sistem Peledak Pygidial
(Sumber : Di Guilio *et al.*, 2015)

Gambar ini menyajikan mikrograf yang menyoroti anatomi internal sistem pertahanan pygidial kumbang bombardier. Struktur ini terdiri dari serangkaian komponen yang terintegrasi untuk menghasilkan semburan kimia yang eksplosif. Saluran Pengumpul (*CD*), yang terlihat sebagai saluran memanjang di bagian kiri bawah, berfungsi mengalirkan cairan dari kelenjar menuju reservoir.

Entomologi Terapan

Cairan ini kemudian disimpan dalam Reservoir Dinamis (*DRE*), yang merupakan bagian atas dan lebih berotot, serta Reservoir Penyimpanan (*SRE*), yang lebih transparan dan berfungsi sebagai tempat penyimpanan utama. Aliran dari reservoir menuju Ruang Reaksi (*Reaction chamber*), sebuah struktur bulat padat di sisi kanan, dikontrol oleh Katup (*VA*) yang kecil. Di dalam ruang reaksi inilah terjadi reaksi kimia eksotermik. Pergerakan dan arah semburan diatur oleh Otot Pengarah (*AM*), yang terlihat sebagai berkas-berkas otot di sekitar ruang reaksi.



Struktur Halus Saluran Pengumpul (*Collecting duct)*
(Sumber : Di Guilio *et al.*, 2025)

a. Komponen Kimia dalam Pertahanan

Dua bahan kimia utama yang terlibat adalah hidrogen peroksida (H_2O_2) dan hidrokuinon ($C_6H_6O_2$). Kedua bahan ini disimpan dalam kantung terpisah untuk mencegah reaksi dini yang dapat membahayakan kumbang. Ketika kumbang merasa terancam, kedua bahan kimia ini dicampur dalam ruang reaksi yang mengandung enzim katalase dan peroksidase sebagai katalisator. Reaksi kimia ini menghasilkan campuran panas berupa uap air dan zat kimia beracun p-benzokuinon ($C_6H_4O_2$), yang berfungsi sebagai senjata pertahanan yang efektif terhadap predator.

b. Reaksi Eksotermik yang Terjadi

Ketika hidrogen peroksida dan hidrokuinon dicampur dalam ruang reaksi, enzim katalase dan peroksidase mempercepat reaksi kimia eksotermik yang sangat cepat, menghasilkan panas hingga sekitar 100°C. Reaksi ini tidak hanya menghasilkan panas tetapi juga gas dan uap air yang bertekanan tinggi, sehingga cairan panas dan beracun tersebut disemprotkan keluar tubuh kumbang dengan kecepatan tinggi (sekitar 300-1000 kali per detik). Mekanisme ini memungkinkan kumbang bombardier mengeluarkan semburan kimia panas yang dapat membakar dan mengusir predator secara efektif tanpa melukai dirinya sendiri.

E. KEGIATAN PEMBELAJARAN

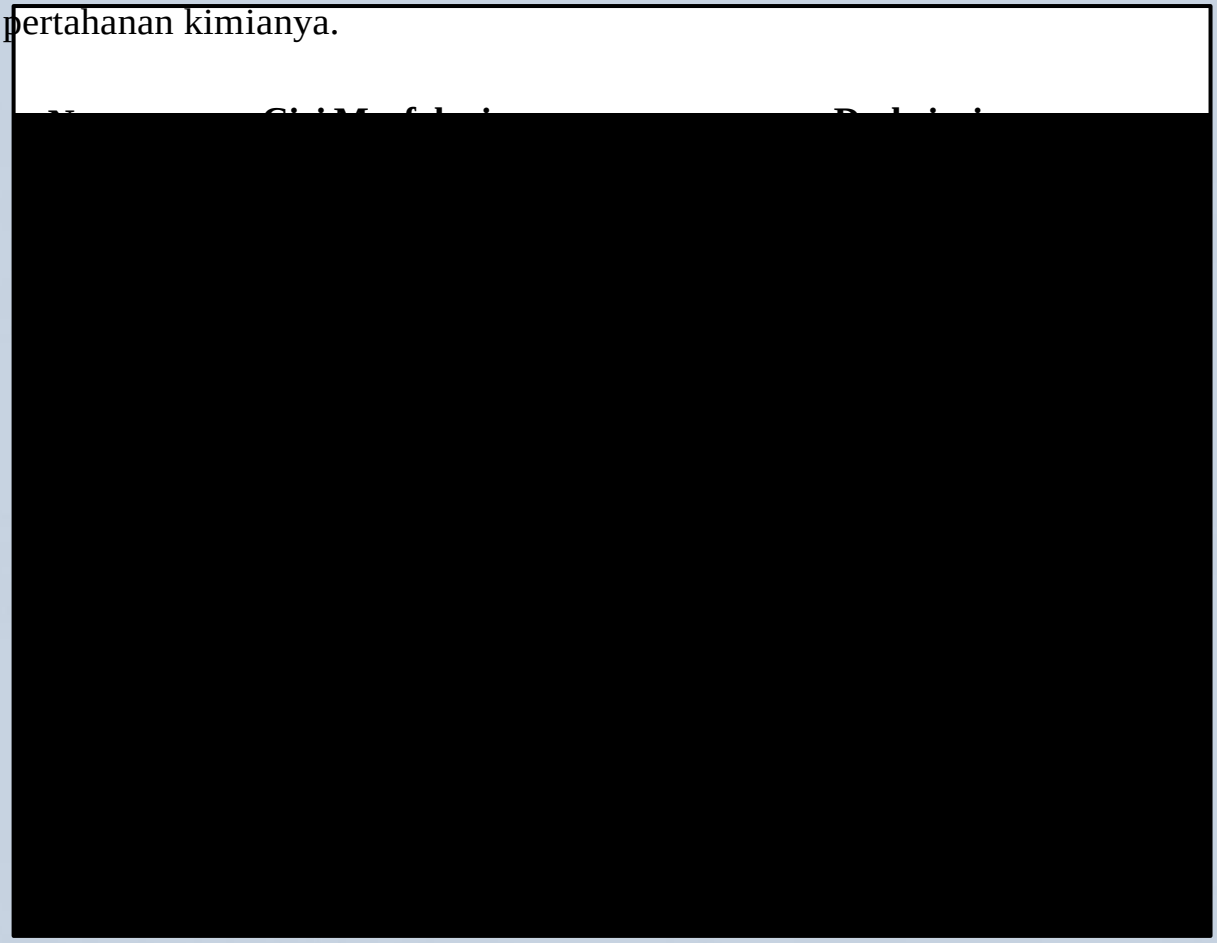
Nama : ……..……

No. Absen : ……..……..……..……

Kelompok : ……..……

Jawablah pertanyaan dibawah ini dengan benar dan uraikan dalam format doc/pdf.

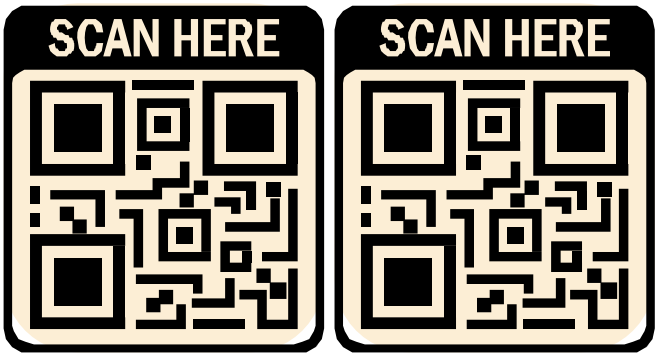
Untuk memperoleh pemahaman yang menyeluruh mengenai sistem pertahanan kimiawi pada kumbang bombardir (*Brachinus* sp.), peserta didik perlu mengidentifikasi terlebih dahulu karakteristik morfologis yang dimiliki oleh serangga tersebut. Tabel berikut disusun untuk membantu mengorganisasi informasi morfologi kumbang bombardir secara sistematis, meliputi ukuran tubuh, warna, struktur, tungkai, sayap, antena, hingga alat pertahanan kimianya.



Bentuk Tubuh

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

Setelah membaca fenomena tentang serangga di atas, silakan pindai kode QR di bawah ini untuk menyaksikan 2 video terkait fenomena tersebut



Penjelasan video diatas

Kumbang bombardir (Brachinus sp.) adalah anggota famili Carabidae yang terkenal karena mekanisme pertahanan diri yang unik dan efektif. Tidak seperti serangga lain yang hanya mengandalkan penyamaran atau kecepatan lari, kumbang ini mampu menyemprotkan cairan panas dari bagian belakang tubuhnya untuk mengusir predator. Di dalam tubuhnya terdapat dua zat kimia berbahaya, yaitu hidrokuinon dan hidrogen peroksida, yang disimpan terpisah di dalam kelenjar khusus. Ketika merasa terancam, kedua zat tersebut dialirkan ke ruang reaksi, tempat enzim katalase dan peroksidase memicu reaksi kimia eksotermik. Reaksi ini menghasilkan p-benzoquinon serta semburan uap panas dengan suhu mendekati 100 °C, yang dikeluarkan melalui saluran di bagian belakang tubuh sebagai mekanisme pertahanan diri yang ampuh

1. Jelaskan bagaimana cara kerja sistem pertahanan kimia pada kumbang bombardir (*Brachinus sp*.)

2. Mengapa hidroquinon dan hidrogen peroksida disimpan secara terpisah dalam tubuh kumbang bombardir sebelum dikeluarkan? Jelaskan alasannya

3. Sekarang setelah anda memahami bagaimana sistem pertahanan kimia kumbang bombardir bekerja, saatnya anda menggunakan pengetahuan tersebut untuk melakukan eksplorasi lebih lanjut melalui kegiatan mini riset.

Berikut langkah-langkah yang perlu anda ikuti:

a) Lakukan pencarian informasi melalui internet, jurnal digital, artikel populer, atau media terpercaya lainnya. anda bisa menggunakan mesin pencari seperti *Science direct/Google Scholar*, atau mengakses perpustakaan digital yang tersedia.

b) Cari artikel yang membahas:

Mekanisme pertahanan kimia kumbang bombardir.

- Fakta ilmiah seputar zat kimia yang digunakan kumbang ini.
- Contoh penerapan konsep ini dalam bidang teknologi atau kehidupan
- sehari-hari (misalnya dalam teknologi militer, sistem penyemprotan, atau bahan pelindung diri).

c) Baca artikel tersebut dengan cermat. Pahami isinya dan hubungkan dengan pengetahuan yang sudah anda pelajari sebelumnya

Identitas Artikel

Judul Artikel:

.....

Nama Penulis:

.....

Tahun/Tanggal Publikasi:

.....

Sumber/Link URL:

.....

Isi dan Pemahaman Artikel

Tuliskan ringkasan isi artikel yang anda baca
(Minimal 2 paragraf – gunakan bahasamu sendiri)

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Apa informasi baru yang anda pelajari dari artikel tersebut?

.....
.....

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Bagaimana artikel ini memperkaya pemahamanmu tentang kumbang bombardir?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Menurutmu, apa bagian paling menarik dari artikel ini? Mengapa?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

4. Untuk memahami mekanisme pertahanan diri kumbang bombardir secara lebih mendalam, mari lakukan pengamatan visual menggunakan teknologi *Augmented Reality (AR)* atau gambar *3D*. Teknologi ini akan membantumu melihat struktur tubuh kumbang secara lebih nyata dan interaktif, terutama bagian-bagian penting seperti kelenjar penghasil senyawa kimia, sistem ekskresi, dan bagian abdomen yang berperan dalam proses pertahanan diri.

Petunjuk Penggunaan Media:

- Siapkan perangkat (gawai atau tablet) yang mendukung pemindaian kode *AR* atau pengamatan gambar *3D*.
- Pindai *barcode AR* yang telah disediakan oleh pendidik.
- Amati secara saksama struktur tubuh kumbang, terutama:
- Bagian abdomen belakang
- Kelenjar penghasil hidrokuinon dan peroksidase
- Saluran pengeluaran zat kimia (*eksplosif*)
- Diskusikan secara singkat dengan teman kelompokmu tentang apa yang anda lihat.
- Setelah pengamatan selesai, lanjutkan untuk mengerjakan soal-soal yang telah disediakan berdasarkan hasil pengamatanmu.



Tangkapan Layar Ornamen Tubuh

5. Berdasarkan pengamatan pada *Ornamen* Kumbang *Bombardier* tersebut, analisis bagaimana struktur tubuh bagian belakang (abdomen) dapat mendukung kemampuan kumbang bombardier menyemprotkan cairan panas sebagai mekanisme pertahanan dirinya?





Kumbang Bombardier Berhasil Lolos dari Sistem Pencernaan Predator

Kumbang *Bombardier* (*Pheropsophus jessoensis*) merupakan kumbang tanah kecil yang termasuk dalam famili *Carabidae* yang dikenal dengan penggunaan strategi pertahanan kimiawi. Biasanya serangga ini dapat ditemukan di serasah daun dan di bawah batu di hutan dan padang rumput. Kumbang *Bombardier* memiliki panjang tubuh 13 milimeter dan elytra gelap dengan barcak berwarna jingga serta memiliki sistem pertahanan diri yang sangat luar biasa seperti julukannya yaitu *Bombardier Beetle*.

Kemampuan kumbang *Bombardier Pheropsophus jessoensis* untuk melarikan diri dalam keadaan hidup dari sistem pencernaan predator amfibi seperti kodok *Bufo japonicus* dan *B. torrenticola*. Dalam kondisi laboratorium, meskipun kumbang selalu ditelan oleh kodok, sekitar 43% dari mereka dimuntahkan kembali dalam waktu 12 hingga 107 menit setelah konsumsi, dan semua kumbang yang dimuntahkan tetap hidup dan aktif. Hal ini terjadi karena *P. jessoensis* mampu menyemprotkan zat kimia panas dan beracun dari ujung perutnya setelah tertelan, memicu respons emetik (muntah) pada kodok. Hasil menunjukkan bahwa keberhasilan pelarian berkorelasi positif dengan ukuran tubuh kumbang dan negatif dengan ukuran tubuh kodok, di mana kumbang yang lebih besar dan kodok yang lebih kecil meningkatkan peluang bertahan hidup. Selain itu, *P. jessoensis* menunjukkan tingkat kelangsungan hidup yang jauh lebih tinggi di dalam lambung kodok dibandingkan spesies karabid lainnya, mengindikasikan bahwa spesies ini telah berevolusi mengembangkan toleransi terhadap cairan pencernaan predator. Perbedaan tingkat muntah dan pencernaan antara dua spesies kodok juga menunjukkan adanya pengaruh sejarah evolusi interaksi predator-mangsa, di mana kodok yang habitatnya tidak tumpang tindih dengan kumbang memiliki toleransi lebih rendah terhadap senyawa kimia pertahanan kumbang. Fenomena ini menyoroti strategi pertahanan kimia aktif dan toleransi fisiologis sebagai mekanisme adaptif yang memungkinkan kelangsungan hidup mangsa bahkan setelah proses penelanan oleh predator.

6. Setelah anda membaca tentang fenomena serangga di atas, jawablah pertanyaan dibawah ini

a. Berdasarkan fenomena di atas, jelaskan bagaimana mekanisme pertahanan diri kumbang Bombardier saat berada di dalam sistem pencernaan kodok

b. Berdasarkan fenomena di atas, apa faktor yang berkorelasi positif dan negatif terhadap keberhasilan kumbang dalam melarikan diri dari sistem pencernaan kodok?

Jawablah pertanyaan di bawah ini

c. Buatlah kesimpulan menyeluruh mengenai efektivitas mekanisme pertahanan kimia kumbang bombardir terhadap predator dan dampaknya terhadap kelangsungan hidup spesies ini. Sertakan juga refleksi tentang bagaimana pemahaman ini bisa diaplikasikan dalam pengembangan ilmu pengetahuan atau teknologi.

d. Desainlah poster yang mampu menyampaikan informasi ilmiah tentang mekanisme pertahanan kumbang bombardir

Instruksi Pengunggahan Poster:

Setelah kalian menyelesaikan pembuatan poster yang menggambarkan mekanisme pertahanan diri kumbang bombardir secara kreatif dan informatif, kini saatnya untuk membagikan hasil karya kalian. Unggahlah poster yang telah dibuat ke dalam folder Google Drive yang telah disediakan oleh pendidik.

Pastikan file poster:

- Memiliki format yang sesuai (JPG/PNG/PDF)
- Diberi nama dengan format: Nama_Kelas_JudulPoster
- Diupload sebelum batas waktu yang ditentukan

SCAN HERE

F. GLOSARIUM

- Agresif Mimikri: Strategi Kamuflase di mana predator serangga menyamar sebagai objek tidak berbahaya, seperti bunga atau daun, untuk mendekati mangsanya tanpa terdeteksi.
- Antropogenik: Istilah yang merujuk pada segala sesuatu yang disebabkan atau dihasilkan oleh aktivitas manusia.
- Aposematisme: Strategi adaptif di mana serangga menggunakan warna cerah dan pola kontras sebagai sinyal peringatan visual untuk mengiklankan bahwa mereka beracun, berbahaya, atau tidak enak bagi predator.
- Bombardier Beetle: Kumbang unik yang dikenal dengan pertahanan kimiawinya yang canggih. Kumbang ini dapat menyemprotkan zat kimia panas dan beracun dari tubuhnya untuk mengusir predator.
- Co-evolusi (Ko-evolusi): Proses evolusi bersama antara dua spesies atau lebih yang saling memengaruhi, seperti hubungan antara predator dan mangsa aposematik di mana predator belajar menghindari mangsa yang beracun.
- Crypsis: Mekanisme Kamuflase yang sangat fundamental pada serangga, di mana mereka menyesuaikan morfologi, warna, dan pola tubuh agar menyatu dengan lingkungan sekitarnya untuk menghindari deteksi.
- Crypsis Transparansi: Kemampuan beberapa serangga untuk menjadi transparan atau tembus cahaya, membuat mereka kurang terlihat karena cahaya dapat menembus tubuh mereka.
- Disruptive Coloration: Strategi Kamuflase yang menggunakan pola warna kontras tinggi dan tidak beraturan pada tubuh serangga untuk memecah garis besar tubuhnya, sehingga sulit bagi predator untuk mengidentifikasi bentuk serangga yang utuh.
- Elytra: Sepasang sayap depan kumbang yang mengeras dan berfungsi sebagai pelindung sayap belakang yang tipis dan membranosa, memungkinkan kumbang untuk terbang.
- Eksoskeleton: Kerangka luar yang keras pada tubuh kumbang bombardier, yang telah berevolusi untuk tahan panas, melindunginya dari semburan kimianya sendiri.
- *Explosion Chamber:* Ruang reaksi khusus di dalam tubuh kumbang bombardier yang dilapisi oleh enzim katalase dan peroksidase, tempat terjadinya reaksi kimia eksotermik yang menghasilkan semburan panas.

- Hidrogen Peroksida: Senyawa kimia yang disimpan di kelenjar kumbang bombardier, bereaksi dengan hidrokuinon untuk menghasilkan semburan kimia panas.
- Hidrokuinon: Senyawa kimia organik yang disimpan di salah satu kelenjar kumbang bombardier dan berfungsi sebagai reaktan dalam mekanisme pertahanan kimianya.
- Indikator Lingkungan: Spesies serangga tertentu yang sensitif terhadap perubahan lingkungan dan dapat digunakan untuk mengukur kualitas habitat.
- Katalase: Enzim yang mempercepat dekomposisi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen, memicu reaksi eksotermik di dalam explosion chamber.
- Mikrograf: Gambar yang diambil melalui mikroskop, digunakan untuk menyoroti anatomi internal serangga secara detail.
- Mortalitas: Laju kematian dalam suatu populasi, yang bersama dengan natalitas, menjaga keseimbangan populasi serangga secara alami.
- Natalitas: Laju kelahiran dalam suatu populasi, yang merupakan salah satu faktor alami yang memengaruhi dinamika populasi serangga.
- P-Benzokuinon: Senyawa beracun yang dihasilkan dari reaksi kimia di dalam explosion chamber dan menjadi zat utama dalam semburan pertahanan kumbang bombardier.
- Peroksidase: Enzim yang mengkatalisis reaksi oksidasi hidrokuinon, menghasilkan p-benzokuinon yang beracun.
- *Pulsed Spray:* Semburan kimia berdenyut yang dikeluarkan oleh kumbang bombardier dengan frekuensi tinggi, menjadikannya efektif dalam mengusir predator.
- Pygidium: Bagian ujung dari abdomen (perut) kumbang, tempat dua kelenjar kimiawi kumbang bombardier berada.
- Reservoirs: Kelenjar penyimpanan di dalam pygidium kumbang bombardier yang menyimpan reaktan kimia secara terpisah.
- Stridulasi: Proses menghasilkan suara pada serangga, seperti yang dilakukan oleh jangkrik, untuk tujuan komunikasi atau sebagai respons pertahanan.
- Thanatosis: Perilaku adaptif pada serangga di mana mereka berpura-pura mati (tonic immobility) saat diserang oleh predator.
- Toleransi: Kemampuan spesies untuk bertahan hidup dan beradaptasi di lingkungan yang terganggu.

G. REFERENSI

- Armitage, M. H. (2004). *The Spray Nozzle of the Bombardier Beetle, Brachinus favicolis Erwin.* Technical Report. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/334001355
- Bura, V. L., Kawahara, A. Y., & Yack, J. E. (2016). *A comparative analysis of sonic defences in Bombycoidea caterpillars.* Scientific Reports 6:31469. https://doi.org/10.1038/srep31469
- Castiglioni, E., García, L. F., Burla, J. P., Arbulo, N., & Fagúndez, C. (2017). *Arañas y carábidos como potenciales bioindicadores en ambientes con distinto grado de intervención antrópica en el este uruguayo: un estudio preliminar*. Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay, 13, 106-114. https://doi.org/10.26461/13.11
- Herlinda, S., Pujiastuti, Y., Irsan, C., Riyanto, Arsi, Anggraini, E., Karenina, T., Budiarti, L., Rizkie, L., & Octavia, D. M. (2021). *Pengantar ekologi serangga. Palembang: Penerbit & Percetakan Universitas Sriwijaya (UNSRI).* ISBN 978-979-587-956-5.
- Hrdlička, J. (2009). *Contribution to the tribe Brachinini (Coleoptera: Carabidae) - III. Six new species of genus Brachinus from S. E. Palaearctic and Oriental region.* Studies and Reports of District Museum Prague-East Taxonomical Series, 5(1-2), 103-114.
- Humphreys, R. K., & Ruxton, G. D. (2018). *A review of thanatosis (death feigning) as an anti-predator behaviour. Behavioral Ecology and Sociobiology, 72*(22). https://doi.org/10.1007/s00265-017-2436-8
- Kojima, W., & Yamamoto, R. (2020). *Defense of Bombardier Beetles against Avian Predators. The Science of Nature*, *107*(5), 36.
- Lin, C. C., & Hedwig, B. (2021). *Wing movements underlying sound production in calling, rivalry, and courtship songs of the cricket Gryllus bimaculatus (DeGeer).* Journal of Insect Physiology, 134, 104299.
- Nafisah, Sarah. (2019). <*Jenis Kumbang Ini Bisa Selamat dari Sistem Pencernaan Kodok*=. Diakses pada tanggal 22 Mei 2025. Tersedia di: https://bobo.grid.id/read/081910464/keren-jenis-kumbang-ini-bisa-selamat-dari-sistem-pencernaan-kodok?page=all
- Shapira, Tali. (2016). <*Biological Artillery Bombardier Beetles*=. Diakses pada tanggal 22 Mei 2025. Tersedia di: https://davidson.weizmann.ac.il/en/online/maagarmada/bombardier-beetle
- Washliyah, S., dkk (2024). *Entomologi*. CV. Media Sains Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/386020738_ENTOMOLOGI

Entomologi Terapan

H. *POSTTEST*

Sebelum mengakhiri kegiatan pembelajaran pada *E-worksheet* ini, dimohon untuk mengikuti *post-test* singkat yang akan berlangsung selama 60 menit. *post-test* ini bertujuan untuk mengukur pemahaman anda mengenai materi yang sudah di ajarkan, dan anda dapat mengakses post-test secara luring maupun daring dengan memindai *barcode* berikut ini,





E-WORKSHEET PjBL - AR

BAB X

Evaluasi Proyek dan Refleksi Belajar

Berbasis Augmented Reality (AR)



A. TUJUAN PEMBELAJARAN EVALUATIF

Bab ini menjadi penutup dari serangkaian pembelajaran entomologi terapan yang telah dilaksanakan dengan memanfaatkan teknologi *Augmented Reality (AR*). Fokus utama bab ini adalah pada proses evaluasi dan refleksi yang sangat penting untuk mengukur keberhasilan *PjBL*, memahami capaian pembelajaran, dan mengidentifikasi area peningkatan di masa mendatang. Melalui evaluasi yang menyeluruh dan refleksi yang mendalam, diharapkan setiap peserta didik mampu menginternalisasi pengetahuan dan keterampilan yang telah diperoleh, serta mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan memecahkan masalah. Menurut Robert F. Mager (1965), tujuan pembelajaran adalah perilaku yang hendak dicapai atau yang dapat dikerjakan oleh peserta didik pada kondisi dan tingkat kompetensi tertentu. Penekanan dari tujuan pembelajaran ada pada perilaku yang dapat diobservasi dan diukur setelah proses pembelajaran. Oemar Hamalik (2014) juga menyatakan bahwa tujuan pembelajaran adalah suatu deskripsi mengenai tingkah laku yang diharapkan tercapai oleh peserta didik setelah berlangsung proses pembelajaran. Perubahan tingkah laku yang diimaksud yaitu indikator tercapainya tujuan.

Secara umum tujuan pembelajaran adalah rumusan yang jelas dan spesifik mengenai kompetensi (pengetahuan, keterampilan, dan sikap) yang diharapkan dapat dikuasai oleh peserta didik setelah melalui proses pembelajaran tertentu. Tujuan ini berfungsi sebagai panduan bagi pendidik dalam merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi kegiatan pembelajaran, serta sebagai tolok ukur bagi peserta didik mengenai apa yang harus mereka capai. Ralph Tyler (1942) mendefinisikan evaluasi adalah sebagai proses penentuan sejauh mana tujuan pendidikan telah dicapai. Penekanan Tyler adalah pada kesesuaian antara hasil yang dicapai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Tujuan pembelajaran evaluatif dapat didefinisikan sebagai sasaran yang ingin dicapai dari sebuah proses penilaian (evaluasi) terhadap pengalaman belajar, yang tidak hanya mengukur hasil akhir, tetapi juga untuk melihat bagaimana proses tersebut berkontribusi pada pengembangan keterampilan dan pemahaman peserta didik.

Bagian ini memaparkan tujuan-tujuan spesifik yang ingin dicapai melalui proses evaluasi pada bab terakhir ini. Adapun beberapa tujuan pembelajaran evaluatif yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan Pencapaian Tujuan Pendidikan/Pembelajaran:

Ralph Tyler (1942) menekankan bahwa tujuan utama evaluasi adalah untuk menentukan sejauh mana tujuan pendidikan telah tercapai. Ini berarti evaluasi berfungsi sebagai alat untuk memastikan apakah apa yang direncanakan (tujuan) benar-benar terwujud dalam diri peserta didik. Dengan demikian, evaluasi dalam *e-worksheet PjBL-AR Entomologi Terapan* tidak hanya mengukur hasil akhir, tetapi juga menjadi panduan untuk meningkatkan kemampuan seperti *digital habits of mind* agar sesuai dengan tujuan dalam bentuk indikator yang telah ditetapkan.

Adapun 21 Indikator *Digital Habits of Mind oleh* Yayu & Nurhadi (2019) yaitu : a) Mempertimbangkan terlebih dahulu informasi.; b) Menilai dan mengidentifikasi informasi; c)Mengejar dan mempertahankan kebenaran informasi; d) Bersifat sensitif terhadap informasi serta memiliki kemampuan menemukan suatu permasalahan sekaligus tanggap untuk merencanakan penyelesaiannya; e) Mencetuskan gagasan penyelesaian masalah yang bersifat global; f) Kemampuan merumuskan pertanyaan-pertanyaan masalah terkait isu Entomologi global dan menganalisis jawabannya; g) Mengidentifikasi suatu permasalahan berdasarkan pengalaman sehari-hari; h) Menentukan keputusan nasional atau lokal dan membedakan penyebab serta akibat sebuah permasalahan rumit; i) Menentukan lebih dari satu metode penyelesaian masalah global; j) Merancang cara penyelesaian masalah global; k) Mencari pengetahuan lain dengan berbagai macam teknologi; l) Menerapkan solusi secara langsung dengan menggunakan informasi kepada isu/masalah Entomologi untuk tujuan yang spesifik; m) Memiliki pengetahuan dan pengalaman tentang konsep dan proses ilmiah untuk memperoleh banyak saran dalam melakukan penyelesaian masalah; n) Memiliki pengetahuan dan pengalaman serta proses ilmiah untuk berpartisipasi dalam masyarakat zaman digital untuk mendapatkan bermacam-macam solusi masalah dan jawaban; o) Memiliki kemampuan menganalisis berbagai cara pemecahan masalah global, sehingga dapat mencetuskan gagasan masalah yang tepat dan melaksanakan gagasan masalah tersebut dengan baik; p) Dapat merumuskan hipotesis dari hasil menganalisis masalah global, membuat hipotesis, mengkritik hipotesis serta melakukan pengujian hipotesis; q) Memiliki kemampuan mengajukan dan mengevaluasi argumen berdasarkan bukti dan menerapkan kesimpulan argumen, sehingga dapat mengetahui kebenaran pertanyaan dan kebenaran rencana penyelesaian masalah; r) Memiliki kemampuan menerapkan suatu kesimpulan dari argumen dengan tepat untuk memperoleh jawaban penyelesaian masalah; s) Memiliki kemampuan untuk menilai terhadap solusi dan metodologinya dengan menggunakan kriteria atau

standar yang cocok untuk memastikan kebenaran, efektivitas, dan manfaat suatu solusi; t) Memiliki kemampuan mengambil suatu kesimpulan dengan tepat mengenai diterima atau ditolaknya argumen atau solusi berdasarkan kriteria yang ditetapkan. u) Memiliki kemampuan membaca, menulis, mendengarkan, dan berbicara informasi Entomologi kompleks dalam konteks digital untuk memecahkan masalah.

2. Menyediakan Informasi untuk Pengambilan Keputusan:

Stufflebeam (2000) mendefinisikan evaluasi sebagai proses penyediaan informasi yang berguna. Informasi ini esensial bagi para pengambil keputusan (pendidik, administrator, pembuat kebijakan). Informasi dapat bersumber dari tema yang di angkat maupun artikel riset.

3. Mendiagnosis Kekuatan dan Kelemahan:

Evaluasi bertujuan untuk mengidentifikasi aspek-aspek yang berhasil dalam pembelajaran (kekuatan) dan area-area yang memerlukan perbaikan (kelemahan) (Reeve & Peerbhoy, 2007). Ini membantu pendidik memahami mengapa peserta didik berhasil atau mengalami kesulitan, sehingga dapat memberikan bimbingan yang lebih tepat.

4. Memberikan Umpan Balik (*Feedback*) :

Evaluasi menyediakan umpan balik tidak hanya kepada peserta didik tentang kemajuan belajar mereka, tetapi juga kepada pendidik tentang efektivitas metode pengajaran yang digunakan, serta kepada pengelola program tentang relevansi kurikulum (Tucker & Stronge, 2005). Umpan balik ini sebagai luaran untuk proses perbaikan.

5. Meningkatkan Kualitas Pembelajaran:

Pada akhirnya, semua tujuan di atas bermuara pada peningkatan kualitas proses belajar mengajar. Dengan memahami apa yang berhasil dan apa yang perlu ditingkatkan, pihak-pihak terkait dapat merancang intervensi dan strategi yang lebih efektif di masa mendatang.

6. Memotivasi Peserta Didik:

Hasil evaluasi yang disampaikan secara konstruktif dapat menjadi pendorong bagi peserta didik untuk mempertahankan atau meningkatkan prestasi mereka.Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa tujuan pembelajaran evaluatif menurut ahli adalah untuk menilai pencapaian tujuan belajar, memberikan dasar bagi keputusan perbaikan, mendiagnosis kebutuhan belajar, dan secara keseluruhan meningkatkan kualitas pengalaman pendidikan.

B. PENILAIAN PROYEK *PJBL*

Penilaian proyek dalam konteks Pembelajaran Berbasis Proyek (*Project-Based Learning/PjBL*) dapat dilaksanakan dengan menggunakan instrumen seperti rubrik penilaian yang terstruktur. Rubrik ini mencakup penilaian terhadap seluruh aspek, baik proses pengerjaan proyek maupun hasil akhir (produk) yang dihasilkan. Rubrik penilaian yang terstruktur adalah alat transparan yang memberikan kerangka kerja yang sistematis untuk menilai kualitas kinerja atau produk belajar, memfasilitasi umpan balik yang efektif, dan mendukung pembelajaran peserta didik. Dalam konteks pendidikan, rubrik penilaian yang terstruktur adalah suatu panduan atau instrumen penilaian yang menyediakan seperangkat kriteria yang jelas, spesifik, dan sistematis beserta deskripsi tingkat capaian (level kualitas) yang diharapkan untuk setiap kriteria tersebut.

Berikut adalah poin-poin kunci yang mendefinisikan rubrik penilaian yang terstruktur:

- Kriteria yang Jelas dan Spesifik

Rubrik dapat menguraikan dengan rinci apa saja aspek atau dimensi kinerja yang akan dinilai. Setiap kriteria harus didefinisikan secara eksplisit sehingga baik penilai maupun peserta didik memahami apa yang diharapkan.

- Deskriptor Kinerja (*Performance Descriptors*)

Untuk setiap kriteria, rubrik menyediakan deskripsi naratif atau poin-poin yang menggambarkan kualitas atau tingkat capaian yang berbeda (misalnya, "Sangat Baik," "Baik," "Cukup," "Kurang"). Deskriptor ini membantu penilai menentukan level mana yang paling sesuai dengan kinerja peserta didik dan memberikan umpan balik yang informatif.

- Skala Penilaian (*Rating Scale*)

Rubrik perlu menggunakan skala penilaian (biasanya numerik, seperti 1-4, atau kategori, seperti A-D) yang terhubung dengan deskriptor kinerja. Skala ini memungkinkan penilaian yang konsisten dan kuantifikasi hasil.

- Fokus pada Pembelajaran dan Umpan Balik

Tujuan utama rubrik terstruktur bukan hanya untuk memberikan nilai, tetapi juga sebagai alat bantu belajar. Dengan adanya kriteria dan deskriptor yang jelas, peserta didik dapat memahami apa yang perlu mereka lakukan untuk mencapai level kinerja yang lebih tinggi. ang efektif, dan mendukung pembelajaran peserta didik.

- Objektivitas dan Konsistensi

Karena adanya kriteria dan standar telah ditetapkan sebelumnya, rubrik membantu mengurangi subjektivitas dalam penilaian dan memastikan konsistensi antar penilai atau antar tugas yang serupa.

Secara spesifik, rubrik dalam *E-worksheet project based learning terintegrasi augmented reality* entomolotgi terapan dapat dirancang untuk mengevaluasi beberapa standar atau indikator kunci, yaitu:

- Kreativitas: Indikator ini menilai kemampuan peserta didik dalam mengembangkan ide-ide orisinal dan inovatif. Ini terlihat dari desain model *Augmented Reality (AR)* yang dibuat hingga cara mereka mempresentasikan hasil proyek secara menarik.
- Pemahaman Konsep Entomologi: Penilaian ini berfokus pada kedalaman dan akurasi pemahaman peserta didik terhadap konsep-konsep dasar entomologi yang relevan dengan topik proyek yang mereka kerjakan.
- Pemanfaatan *AR*: Aspek ini mengevaluasi efektivitas dan kecerdasan peserta didik dalam mengintegrasikan teknologi *Augmented Reality (AR)* sebagai alat untuk memvisualisasikan data, menjelaskan konsep yang kompleks, atau menciptakan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan menarik.

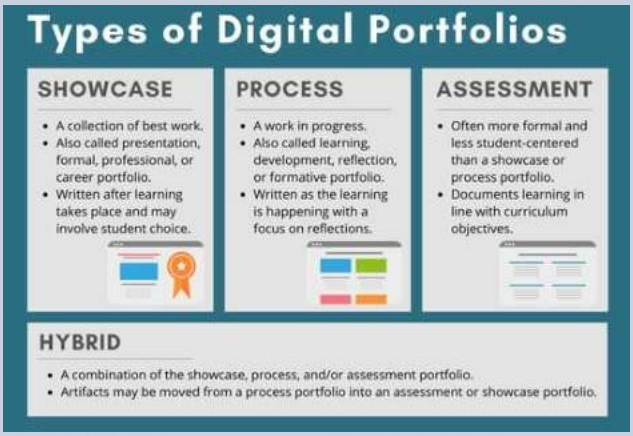
Sebagai panduan praktis, contoh format penilaian akan disertakan dalam *E-Worksheet* ini. Format ini akan memudahkan baik pendidik maupun peserta didik dalam melacak kemajuan proyek serta memberikan umpan balik yang konstruktif untuk pengembangan lebih lanjut.

C. PORTOFOLIO PROYEK DIGITAL

Dalam upaya mendokumentasikan dan menampilkan capaian pembelajaran secara terarah, setiap peserta didik atau kelompok dapat menyusun sebuah portofolio proyek digital. Dalam konteks penilaian berbasis kinerja, Marzano dkk (1993) mendefinisikan portofolio sebagai kumpulan pekerjaan peserta didik yang menunjukkan kemajuan, kemampuan, dan refleksi terhadap pembelajaran mereka. Grant Wiggins (2011) juga mendefinisikan portofolio sebagai "kumpulan yang disengaja dan terorganisir dari karya peserta didik yang menunjukkan upaya, kemajuan, dan prestasi peserta didik dalam satu atau lebih bidang.

Portofolio proyek digital dapat didefinisikan sebagai kumpulan terorganisir dari bukti-bukti hasil belajar peserta didik yang disimpan dalam format elektronik, mencakup karya-karya terbaik, proses pengerjaan, dan refleksi terhadap pembelajaran.

Portofolio juga dapat dikelompokkan menjadi empat jenis utama, yaitu *showcase* (kumpulan karya terbaik), *process* (menunjukkan proses belajar), *assessmen*t (digunakan untuk evaluasi formal), dan *hybrid* (gabungan dari jenis-jenis tersebut).



Tipe-Tipe Portopolio Peserta Didik
(Sumber : portfolio.ascollege.wa.edu.au)

Portofolio ini berfungsi sebagai kompilasi bukti hasil belajar yang meliputi berbagai elemen penting, yaitu:

1) Dokumentasi Proyek

Bagian ini akan berisi catatan perkembangan, sketsa awal, serta foto-foto yang merekam seluruh proses pengerjaan proyek dari tahap perencanaan hingga finalisasi. Hal ini memberikan gambaran tentang perjalanan dan evolusi ide.

2) Model AR

Peserta didik dapat menyertakan tautan atau file digital dari model tiga dimensi (3D) dan aplikasi Augmented Reality (AR) yang telah mereka kembangkan. Model 3D adalah representasi objek tiga dimensi dalam ruang digital, sementara Augmented Reality (AR) adalah teknologi yang menggabungkan informasi digital (seperti objek 3D, gambar, atau teks) ke dalam pandangan dunia nyata pengguna.

E-Worksheet Project Based Learning Berbasis *Augmented Reality*
Entomologi Terapan

secara *real-time*, seringkali melalui kamera perangkat seluler atau kacamata khusus. Ini menunjukkan kemampuan mereka dalam mengaplikasikan teknologi pada proyek.

3) Laporan

Laporan tertulis yang disusun secara sistematis akan merinci tujuan proyek, metodologi yang digunakan, hasil yang diperoleh, serta kesimpulan dari keseluruhan kegiatan. Pengumpulan dan penilaian portofolio ini akan dipermudah melalui integrasi format *E-Worksheet*. *E-Worksheet* sebagai lembar kerja elektronik atau digital yang dirancang untuk diisi, diakses, dan disimpan secara daring atau melalui perangkat digital, seringkali dilengkapi dengan fitur interaktif. Pemanfaatan *E-Worksheet* tidak hanya memastikan akses yang mudah dan terorganisir bagi pendidik, tetapi juga memfasilitasi proses evaluasi yang efisien terhadap seluruh komponen portofolio digital. Dalam konteks portofolio proyek belajar (terutama di lingkungan pendidikan), para ahli menekankan bahwa portofolio harus lebih dari sekadar kumpulan hasil kerja. Ia harus mencerminkan proses pembelajaran, pengembangan keterampilan, dan refleksi peserta didik. Berikut adalah elemen-elemen penting dalam portofolio proyek belajar menurut pandangan para ahli, yang dapat disintesis dari berbagai definisi dan praktik terbaik:

1. Karya (Produk) Proyek (*Project Artifacts/Products*):

Karya adalah hasil nyata dari proyek yang telah diselesaikan peserta didik. Elemen ini menunjukkan capaian konkret dan aplikasi pengetahuan. Contohnya bisa berupa:

- Laporan akhir
- Model fisik atau digital (seperti model *3D AR* yang disebutkan)
- Presentasi (video, slide)
- Prototipe
- Kode program
- Desain atau *blueprint*

2. Dokumentasi Proses (*Process Documentation*)

Elemen ini sangat penting karena menunjukkan bagaimana peserta didik sampai pada produk akhirnya. Dokumentasi Proses mencakup beberapa elemen yaitu sebagai berikut:

a. Catatan/Jurnal Belajar

Refleksi harian atau mingguan tentang apa yang dipelajari, tantangan yang dihadapi, dan strategi yang digunakan untuk mengatasinya.

b. Sketsa/Draf Awal

Rancangan sebagai bukti ide-ide awal, perubahan, dan evolusi proyek.

c. Rencana Proyek

Dapat berupa jadwal, pembagian tugas, dan strategi pengerjaan.

d. Bukti Kolaborasi

Catatan hasil diskusi rapat tim, *chat logs*, atau foto kegiatan kelompok yang menunjukkan kerja sama.

e. Umpan Balik

Umpan balik yang diterima dari pendidik atau teman sebaya, serta bagaimana umpan balik tersebut diintegrasikan.

3. Refleksi Diri (*Self-Reflection)*

Elemen ini adalah inti dari portofolio yang efektif, seperti yang ditekankan oleh Grant Wiggins. Ini menunjukkan kemampuan peserta didik untuk berpikir meta-kognitif tentang pembelajaran mereka. Refleksi bisa dalam bentuk:

a) Pernyataan Reflektif

Esai singkat atau paragraf tentang apa yang mereka pelajari dari proyek, bagaimana mereka mengatasi kesulitan, keterampilan apa yang berkembang, dan bagaimana pengalaman ini relevan dengan tujuan belajar mereka.

b) Evaluasi Diri

Bentuk Penilaian diri terhadap kinerja mereka berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan.

c) Penetapan Tujuan di Masa Depan

Penetapan tujuan didasarkan pada hal berbeda apa yang akan dilakukan peserta didik di proyek selanjutnya atau bagaimana mereka akan menerapkan pembelajaran ini.

4. Bukti Kemajuan dan Perkembangan (*Evidence of Growth and Development*)

Portofolio harus menunjukkan perjalanan belajar peserta didik dari waktu ke waktu. Bukti kemajuan dan perkembangan ini bisa berupa:

- Perbandingan antara draf awal dan akhir.
- Contoh pekerjaan dari berbagai tahapan proyek yang menunjukkan peningkatan keterampilan atau pemahaman.
- Perkembangan pemikiran atau ide dari waktu ke waktu.

Dengan adanya portofolio proyek belajar yang efektif dan mengintegrasikan seluruh elemen esensial, pendidik dapat menyajikan gambaran utuh tentang perkembangan dan pencapaian pembelajaran kepada peserta didik.

D. REFLEKSI PEMBELAJARAN DAN PENGALAMAN

Donald Schön (1986) mendefinisikan refleksi sebagai dua kondisi dimana seseorang memiliki kemampuan untuk berpikir dan menyesuaikan diri secara spontan dalam situasi yang sedang berlangsung maupun tinjauan kembali secara retrospektif terhadap apa yang telah terjadi, mengapa itu terjadi, dan apa yang bisa dilakukan secara berbeda di masa depan. Dalam Hopkins (1993), Kolb menyebutkan bahwa refleksi berfungsi sebagai jembatan vital yang menghubungkan pengalaman langsung dengan konseptualisasi (pembentukan ide-ide abstrak). Melalui jembatan inilah, individu dimampukan untuk mengubah pengalaman murni menjadi pengetahuan yang terstruktur dan bermakna.

Refleksi pembelajaran merupakan suatu proses kognitif yang disengaja dan sistematis di mana individu secara kritis meninjau, menganalisis, dan mengevaluasi pengalaman belajar mereka (baik selama maupun setelah terjadi) untuk mendapatkan pemahaman baru, mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan, serta merumuskan strategi untuk perbaikan dan pengembangan di masa depan. Ini adalah mekanisme penting untuk mengubah pengalaman menjadi pembelajaran yang bermakna dan berkelanjutan.

Refleksi pembelajaran sebagai bentuk komponen fundamental yang esensial untuk menguatkan pemahaman konseptual dan memfasilitasi pembelajaran mendalam dalam konteks proyek entomologi terapan berbasis *Augmented Reality (AR*). Refleksi sendiri adalah proses introspeksi dan analisis kritis terhadap pengalaman, tindakan, atau pemikiran diri sendiri, bertujuan untuk mendapatkan wawasan baru dan meningkatkan kualitas di masa depan.

Dalam konteks *PjBL* entomologi terapan ini, aktivitas refleksi akan melibatkan serangkaian kegiatan sebagai berikut.

a) Aktivitas Refleksi Individu dan Kelompok

Pada tahap pertama dari aktivitas refleksi individu dan kelompok diawali melalui pertanyaan terbuka yaitu pertanyaan yang mendorong jawaban naratif dan eksplorasi ide daripada sekadar jawaban ya/tidak serta sesi diskusi, peserta didik akan diajak untuk secara sistematis merenungkan pengalaman belajar yang telah mereka lalui selama pengerjaan *e-worksheet PjBL-AR* entomologi terapan. Ini termasuk mengidentifikasi tantangan yang dihadapi dalam identifikasi serangga, pembuatan model *AR*, atau analisis data, dan merumuskan solusi yang berhasil

ditemukan elama proses pembelajaran.

Adapun beberapa contoh dari aktivitas refleksi dalam *PjBL* Berbasis *AR* Entomologi Terapan yaitu sebagai berikut :

1) Sesi Diskusi Reflektif Mingguan (Kelompok):

- Pertanyaan Pembuka: "Apa tantangan terbesar yang kami hadapi minggu ini dalam mengidentifikasi serangga di lapangan atau saat membuat model *AR*-nya?"
- Pertanyaan Eksplorasi: "Bagaimana kami mengatasi masalah teknis pada aplikasi *AR*? Apa yang kami pelajari tentang morfologi serangga saat memodelkannya dalam *3D*?"
- Pertanyaan Koneksi: "Bagaimana pengalaman kami di lapangan memengaruhi pemahaman kami tentang ekologi serangga yang divisualisasikan melalui *AR*?"
- Pertanyaan Evaluasi Diri: "Seberapa efektif kolaborasi tim kami dalam memecahkan masalah X? Apa yang bisa kami tingkatkan untuk minggu depan?"

2) Refleksi Individu Akhir Proyek (Tertulis/Lisan):

- "Apa tiga hal terpenting yang saya pelajari tentang serangga dan teknologi *AR* selama proyek ini?"
- "Bagaimana proyek ini mengubah pandangan saya tentang peran serangga dalam ekosistem atau potensi *AR* dalam pembelajaran sains?"
- "Keterampilan apa (misalnya, observasi, pemodelan *3D*, pemecahan masalah teknis) yang paling berkembang dalam diri saya selama proyek ini dan mengapa?"
- "Jika saya bisa mengulang proyek ini, apa satu hal yang akan saya lakukan secara berbeda dan mengapa?"

b) Penulisan Jurnal Digital

Jurnal digital merupakan sebuah catatan pribadi atau profesional yang disimpan dalam format elektronik, seringkali interaktif dan dapat diakses daring. Menurut Kathleen Blake Yancey (1998), jurnal dapat dipahami sebagai "ruang untuk memikirkan secara bebas, untuk merekam, untuk mencoba ide-ide, dan untuk membentuk diri sendiri.". Dalam konteks ini, jurnal ini akan secara langsung terhubung dengan galeri *AR* serangga yang telah mereka gunakan dalam proyek, memfasilitasi pengaitan langsung antara pengalaman reflektif peserta didik dengan visualisasi interaktif dari spesimen serangga *3D* yang telah mereka pelajari. Integrasi ini secara signifikan memperkaya pemahaman serta koneksi antara teori

entomologi dan praktik visualisasi *AR*. Sebagai fitur tambahan, jurnal digital memungkinkan peserta didik untuk menyisipkan tautan langsung ke model *AR* serangga atau tangkapan layar dari galeri *AR* mereka, sehingga refleksi tekstual dapat dikontekstualisasikan secara visual.

Adapun beberapa contoh dari judul Jurnal Digital yang relevan dengan pembelajaran *PjBL* berbasis *AR* konsep entomologi terapan yaitu sebagai berikut :

1) "Jurnal Refleksi Proyek: Memahami Polinasi Lebah Madu (*Apis mellifera)* melalui *AR*"

2) "Di Balik Pemodelan *AR*: Belajar Peran Kepik Predator (*Coccinellidae*) dalam Pengendalian Hayati"

3) "Refleksi Morfologi Serangga: Pengalaman Membangun Model *3D* Semut Gurun (*Cataglyphis bombycina*) dengan *AR*"

4) "Tantangan dan Pembelajaran dalam Visualisasi *AR* Nyamuk DBD (*Aedes aegypti)* sebagai Vektor Penyakit"

5) "Dari Observasi Lapangan hingga Visualisasi *AR* Lalat Bangkai (*Sarcophaga sp*): Jurnal Refleksi Peran Dekomposisi"

6) "Jurnal Eksplorasi Serangga Penghasil Bahan Bernilai Ekonomi: Refleksi Penggunaan *AR* pada Ulat Sutra (*Bombyx mori*)"

7) "Pengalaman Kolaborasi Tim: Membangun Aplikasi *AR* untuk Mempelajari Parasitisme Tawon Parasitoid (*Ichneumonidae*)".

8) "Jurnal Refleksi Strategi Pertahanan Serangga Beracun: Studi Kasus Kumbang Bombardier (*Brachinus sp*) dengan *AR*"

9) "Proyek Entomologi *AR*: Analisis Adaptasi Serangga di Lingkungan Ekstrem (Studi Kasus Semut Gurun)".

10) Eksplorasi Serangga Akuatik: Jurnal Belajar Studi *Water Strider* (*Gerridae*)

Keseluruhan dari contoh aktivitas dan pilihan judul jurnal ini dirancang secara strategis untuk mendorong mahasiswa calon guru biologi tidak hanya sekadar

merekam luaran proyek, tetapi juga untuk secara mendalam menganalisis alasan di balik tindakan mereka dan mengidentifikasi pembelajaran kunci yang diperoleh. Lebih dari itu, pengalaman ini bertujuan untuk membentuk Digital Habits of Mind yang esensial, seperti berpikir kritis, mengelola informasi digital, dan berkolaborasi secara efektif menggunakan teknologi. Dengan demikian, penerapan *E-Worksheet* dan *AR* dalam pembelajaran entomologi terapan menjadi fondasi transformatif bagi mahasiswa untuk menjadi pendidik yang kompeten dan inovatif, siap membimbing generasi mendatang dalam era digital.

E. KUIS DAN EVALUASI BERBASIS *AR*

Untuk mengukur pemahaman konsep secara interaktif dan inovatif, dapat dilaksanakan aktivitas kuis evaluasi dengan memanfaatkan teknologi *Augmented Reality (AR)*. Kuis evaluasi adalah serangkaian pertanyaan atau tugas yang dirancang untuk menilai tingkat pemahaman, pengetahuan, atau keterampilan peserta didik terhadap materi yang telah dipelajari. Pelaksanaan kuis dapat didukung oleh *AR marker*. Menurut Craig (2013), *AR marker* adalah gambar atau objek tertentu (seperti kode *QR*, gambar spesifik, atau penanda visual lainnya) yang ketika dipindai oleh kamera perangkat yang mendukung *AR*, akan memicu tampilan konten digital *Augmented Reality* di atas dunia nyata.

Sebagai contoh implementasi dalam aplikasi *AR*, peserta didik dapat menggunakan perangkat mereka (misalnya ponsel pintar atau tablet) untuk memindai *AR* marker yang telah disediakan (Carreon et al., 2020). Pemindaian ini secara otomatis akan memunculkan model *3D* serangga yaitu representasi tiga dimensi digital dari serangga yang telah dipelajari yang tampak seolah-olah berada di lingkungan fisik mereka (Ilobinso et al., 2025).



AR Marker Insecta
Sumber : ITFunia.InsectsApp

Soal-soal kuis yang telah rancang kemudian akan disajikan secara digital, meminta peserta didik untuk :

- Mengidentifikasi bagian tubuh serangga langsung pada model *3D AR* yang muncul. Peserta didik dapat diminta mengetuk bagian tertentu dari spesimen

pada model dan menyebutkan namanya.

- Menjelaskan fungsi bagian tubuh serangga tersebut berdasarkan identifikasi yang telah dilakukan.
- Mengaitkan serangga dengan habitatnya atau peran ekologisnya, dengan visualisasi atau petunjuk yang juga terintegrasi dalam objek *AR*.

Seluruh pertanyaan dan interaksi akan menggunakan objek *AR* yang telah dipelajari dalam modul-modul sebelumnya serta perlu memastikan relevansi dan pengalaman evaluasi yang imersif.

Adapun contoh soal kuis yang dapat disajikan dalam entomologi terapan berbasis *AR* yaitu :

Asumsi kegiatan disaat peserta didik telah memindai *AR* marker dan model *3D* serangga terkait telah muncul di perangkat mereka

a) Tema : Pollinasi (Lebah Madu - Apis mellifera)
Soal *AR*: Sentuh bagian tubuh Apis mellifera yang digunakan untuk mengumpulkan serbuk sari. Jelaskan fungsinya dalam proses penyerbukan.

b) Tema : Pengendali Hayati (Kepik Predator - Coccinellidae)
Soal *AR*: Temukan bagian mulut kepik predator pada model *3D*. Bagaimana struktur bagian mulut ini mendukung perannya sebagai predator hama?

c) Tema : Adaptasi di Lingkungan Ekstrem (Semut Gurun / *Cataglyphis bombycina)*
Soal *AR*: Amati model *3D* Semut gurun. Bagian tubuh mana yang secara spesifik membantu semut ini bertahan di suhu ekstrem gurun? Jelaskan adaptasinya.

d) Tema : Vektor Penyakit (Nyamuk DBD - *Aedes aegypti*)
Soal *AR*: Sentuh bagian tubuh Aedes aegypti yang berperan dalam mengisap darah. Mengapa bagian ini krusial dalam transmisi penyakit DBD?

e) Tema : Dekomposisi (Lalat Bangkai - *Sarcophaga sp*)
Soal *AR*: Identifikasi bagian mulut Lalat Bangkai pada model *3D*. Bagaimana Lalat Bangkai dengan bagian mulut tersebut berkontribusi dalam proses dekomposisi organik?

f) Tema : Bahan Bernilai Ekonomi (Ulat Sutra - Bombyx mori)
Soal *AR*: Pada model *3D* larva Bombyx mori, sentuh bagian yang menghasilkan serat sutra. Jelaskan singkat bagaimana serat tersebut diproduksi.

g) Tema : Parasitisme (Tawon Parasitoid - Ichneumonidae)
Soal *AR*: Temukan ovipositor pada model *3D* Tawon Parasitoid. Bagaimana Tawon ini menggunakan ovipositornya untuk mengendalikan populasi inangnya?

h) Tema : Pertahanan Serangga Beracun (Kumbang Bombardier - *Brachinus sp)*
Soal *AR*: Amati model *3D* Kumbang Bombardier. Jelaskan mekanisme pertahanan kimiawi yang digunakan kumbang ini untuk menghadapi predator.

i) Tema : Eksplorasi Serangga Akuatik: Jurnal Belajar Studi Water Strider (Gerridae)
Soal *AR*: Menggunakan model *3D* water strider di atas permukaan air, sentuh bagian kakinya yang menyentuh air. Jelaskan mengapa serangga ini tidak tenggelam.

F. FORUM DISKUSI DAN UMPAN BALIK

Dalam rangka memfasilitasi komunikasi konstruktif dan pengembangan kolaborasi, fitur forum diskusi di *Learning Management System (LMS)* atau kelas digital dapat dimanfaatkan secara optimal. Forum diskusi adalah platform daring yang memungkinkan interaksi asinkron antara pengguna untuk berbagi ide, pertanyaan, dan umpan balik, sementara *LMS* adalah sistem perangkat lunak untuk mengelola, menyampaikan, dan melacak pembelajaran, dan kelas digital merujuk pada lingkungan belajar virtual yang meniru pengaturan kelas fisik.
Integrasi forum ini dalam *E-worksheet PjBL berbasis AR* materi entomologi terapan akan menjadi ruang vital bagi peserta didik untuk :

- Berbagi hasil proyek dan pengalaman belajar dengan teman sebaya. Sebagai contoh implementasi, peserta didik dapat mengunggah tangkapan layar atau tautan video demo aplikasi *AR* identifikasi serangga mereka ke dalam forum diskusi di platform *LMS* seperti *MoodleDoc* atau *Google Classroom*. Mereka kemudian dapat menulis deskripsi singkat tentang proses pembuatannya dan tantangan yang dihadapi.
- Memberikan dan menerima saran perbaikan dari pendidik dan teman sebaya, sehingga mendorong terciptanya lingkungan belajar kolaboratif. Misalnya, seorang peserta didik dapat memberikan umpan balik kepada kelompok lain mengenai akurasi model *3D* serangga *Aedes aegypti* atau memberikan saran untuk meningkatkan interaktivitas visualisasi siklus hidup *Bombyx mori* di aplikasi *AR* mereka. pendidik juga dapat memberikan insight yang lebih mendalam mengenai konsep entomologi atau teknis *AR* yang relevan.

Melalui interaksi ini, diharapkan pemahaman materi entomologi terapan semakin kuat dan keterampilan komunikasi serta pemecahan masalah peserta didik pun terasah secara berkelanjutan.



Forum Group Discussion MoodleDoc
*(*Sumber : https://docs.moodle.org/)

G. STUDI KASUS PROYEK NYATA

Untuk memperkaya pemahaman dan memberikan inspirasi konkret, bab ini dapat menyajikan dan menjelaskan studi kasus proyek entomologi berbasis *AR* yang telah berhasil dikembangkan oleh peserta didik pada tahun-tahun sebelumnya. Studi kasus adalah suatu metode penelitian yang mendalam dan terperinci terhadap suatu unit atau fenomena tunggal (dalam hal ini, sebuah proyek peserta didik), dengan tujuan untuk mendapatkan pemahaman yang kaya tentang konteks, proses, dan hasilnya. Yin (2009) mendefinisikan studi kasus sebagai penyelidikan empiris yang menyelidiki fenomena kontemporer dalam konteks kehidupan nyata, menggunakan berbagai sumber bukti. Menurut John W. Creswell (2017), studi kasus adalah salah satu dari lima metode penelitian kualitatif utama. Ini adalah desain penelitian yang memungkinkan peneliti untuk mengeksplorasi secara mendalam suatu program, peristiwa, atau individu. Dalam pendekatan ini, peneliti mengumpulkan data rinci dari berbagai sumber selama periode waktu tertentu untuk memahami kasus tersebut secara komprehensif.

Studi kasus ini dirancang untuk menunjukkan:

- Berbagai pendekatan yang dapat diterapkan dalam merancang dan melaksanakan proyek *PjBL* berbasis *AR*, mulai dari metode pengumpulan data entomologi hingga teknik pemodelan dan implementasi *AR*.
- Tingkat kreativitas yang dapat dicapai oleh peserta didik dalam memecahkan masalah, mendesain visualisasi, dan menyajikan informasi secara inovatif melalui teknologi *AR*. Misalnya, akan ditunjukkan bagaimana sebuah tim peserta didik berhasil membuat model *AR* yang interaktif untuk menjelaskan siklus hidup *Bombyx mori* (ulat sutra) secara tiga dimensi, atau bagaimana kelompok lain mengembangkan aplikasi *AR* untuk membantu identifikasi *Ichneumonidae* (tawon parasitoid) di lapangan.
- Hasil yang dapat dicapai dari sebuah proyek yang terencana dengan baik, termasuk kualitas model *AR*, akurasi data entomologi, dan keberhasilan dalam memecahkan masalah yang telah diidentifikasi.

Melalui telaah studi kasus ini, diharapkan peserta didik memperoleh gambaran nyata mengenai potensi dan standar proyek, sekaligus mendapatkan inspirasi berharga untuk pengembangan proyek mereka sendiri di masa depan, baik dalam bidang entomologi terapan maupun pemanfaatan teknologi *AR*.

PENUTUP

Bagian penutup ini menjadi epilog dari seluruh perjalanan pembelajaran entomologi terapan yang telah kita tempuh, di mana teknologi *Augmented Reality (AR)* telah menjadi fasilitator utama. Intisari dari pengalaman pembelajaran ini menegaskan bahwa studi entomologi tidak lagi terbatas pada narasi tekstual dalam buku, melainkan meluas melalui pengalaman langsung di lapangan, eksplorasi interaktif yang didukung oleh teknologi *AR*, dan kolaborasi sinergis dalam pengerjaan proyek. Pembelajaran melalui *E-Worksheet Project Based Learning* berbasis *AR* Entomologi Terapan ini tidak hanya mengukuhkan pemahaman Anda tentang dunia serangga yang kompleks, tetapi juga membukakan wawasan baru tentang bagaimana inovasi teknologi dapat merevolusi cara kita belajar dan berinteraksi dengan sains biologi. Proses evaluasi dan refleksi yang telah dibahas pada bab ini secara tegas menggarisbawahi pentingnya pendekatan pembelajaran autentik, di mana nilai dari proses pembelajaran itu sendiri memiliki kedudukan setara dengan hasil akhir (produk) yang dicapai.

Diharapkan pengalaman edukatif ini tidak hanya memperkaya khazanah pengetahuan Anda dalam bidang entomologi, tetapi juga membekali Anda dengan serangkaian keterampilan krusial abad ke-21, seperti kemampuan berpikir kritis, kreativitas, dan kolaborasi. Selain itu, pengalaman ini secara spesifik telah melatih dan membangun Digital Habits of Mind, sebuah kompetensi yang esensial bagi mahasiswa calon guru biologi untuk mengintegrasikan teknologi secara efektif dan etis dalam praktik mengajar mereka di masa depan.. Lebih jauh lagi, buku ini diharapkan dapat menjadi fondasi yang kokoh bagi Anda, sebagai calon pendidik atau praktisi biologi, untuk terus mengeksplorasi keajaiban dunia serangga, dan bahkan menjadi pionir dalam pengembangan solusi berbasis *AR* untuk konservasi, pertanian, atau kesehatan masyarakat di masa depan.

Mari kita teruskan semangat berinovasi dalam pendidikan biologi

GLOSARIUM

- Anatomi (Serangga): Studi tentang struktur internal serangga, seperti sistem pencernaan, saraf, atau reproduksi.
- *Augmented Reality (AR):* Teknologi yang menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital (objek virtual tiga dimensi - *3D*) secara real-time melalui perangkat seperti smartphone atau tablet, memungkinkan pengguna berinteraksi dengan objek virtual tersebut seolah-olah ada di dunia fisik.
- *E-Worksheet (Lembar Kerja Digital*): Dokumen digital interaktif yang terintegrasi dengan elemen multimedia (teks, gambar, video, audio) dan teknologi imersif (seperti *AR*), dirancang untuk memandu peserta didik melalui serangkaian tugas berbasis proyek, memungkinkan mereka untuk mencatat, menganalisis, dan menyajikan data secara digital. Berfungsi sebagai pusat kendali atau dashboard bagi peserta didik.
- Entomologi Medis dan Veteriner: Bidang ilmu yang secara spesifik mempelajari serangga yang bertindak sebagai vektor penyakit, yaitu organisme yang menularkan patogen dari satu inang ke inang lain, baik manusia maupun hewan.
- Entomologi Terapan: Disiplin ilmu yang berfokus pada studi serangga dan aplikasinya untuk memecahkan masalah praktis yang berkaitan dengan manusia, lingkungan, dan ekosistem.
- Hama: Setiap spesies serangga yang menimbulkan kerugian ekonomi, ekologi, atau estetika pada tanaman budidaya, ternak, atau produk simpanan, serta mengganggu kesehatan manusia.
- Investigasi Otentik (*PjBL*): Proses pencarian dan analisis informasi, data, atau bukti melalui metode yang relevan dengan disiplin ilmu yang dipelajari, seringkali melibatkan kegiatan lapangan, eksperimen, wawancara, atau analisis data riil.
- Klasifikasi (Serangga): Sistematisasi serangga ke dalam kelompok-kelompok berdasarkan kekerabatan evolusioner dan karakteristik bersama, memudahkan identifikasi dan studi.
- *Marker-Based AR* (*AR* Berbasis Penanda): Jenis AR yang menggunakan gambar atau objek pradefinisi (disebut marker atau penanda, seringkali berupa kode QR atau pattern spesifik) untuk memicu dan menempatkan konten virtual.

Entomologi Terapan

- *Markerless AR* (*AR* Tanpa Penanda): Jenis *AR* yang mampu menempatkan objek virtual di lingkungan nyata tanpa memerlukan marker fisik, melainkan mengandalkan algoritma canggih seperti *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)* untuk menganalisis fitur-fitur lingkungan.
- *MoodleDocs* : *platform* perangkat lunak yang dirancang untuk membantu pendidik, administrator, dan siswa membuat dan mengelola lingkungan belajar daring yang personal.
- Morfologi (Serangga): Fokus pada struktur eksternal serangga yang terlihat, seperti bagian mulut, antena, sayap, dan kaki.
- Pengendalian Hama Terpadu (PHT): Sistem pengelolaan hama yang mempertimbangkan semua teknik pengendalian yang tersedia dan mengintegrasikan tindakan yang tepat untuk menjaga populasi hama di bawah ambang batas kerusakan ekonomi dengan menggunakan cara yang paling tidak berbahaya bagi manusia dan lingkungan, melibatkan kombinasi metode biologis, kultur teknis, fisik, genetik, dan kimia.
- Presentasi Hasil (*PjBL*): Proses di mana peserta didik mensintesis temuan investigasi mereka dan mengomunikasikannya kepada audiens nyata dalam format yang beragam.
- *Project-Based Learning* (*PjBL*): Model pembelajaran inovatif yang menempatkan peserta didik sebagai pusat pembelajaran melalui keterlibatan aktif dalam proyek-proyek yang relevan dan bermakna. Metodologi ini mendorong pembelajaran aktif melalui proyek autentik.
- Pertanyaan Pemicu (*Driving Question - PjBL)*: Pertanyaan terbuka yang kompleks, relevan, dan memprovokasi pemikiran mendalam, menjadi titik tolak bagi setiap proyek.
- Serangga *Dekomposer / Detritivora*: Serangga yang memecah materi organik mati (misalnya, serangga pengurai bangkai, rayap, atau kumbang kotoran), berperan penting dalam siklus nutrisi dan menjaga kesuburan tanah.
- Serangga Penyerbuk: Serangga yang memfasilitasi transfer serbuk sari dari kepala sari ke putik bunga, krusial untuk reproduksi sebagian besar tanaman berbunga, termasuk tanaman pangan.
- Simulasi *AR*: Representasi virtual yang dinamis dan interaktif dari suatu fenomena atau proses dunia nyata, memungkinkan peserta didik bereksperimen dengan variabel dan mengamati hasilnya tanpa risiko

atau biaya dari percobaan fisik.

- Unity: *Game engine* dan *development platform* lintas platform yang kuat, dilengkapi dengan SDK *AR*, memungkinkan pengembang untuk membangun aplikasi *AR* yang kompleks dengan model *3D* interaktif, animasi, dan user interface yang kaya.
- Vektor Penyakit (Serangga): Organisme (dalam hal ini serangga) yang menularkan patogen dari satu inang ke inang lain, baik manusia maupun hewan.
- Zappar: Platform pengembangan *AR* yang berfokus pada kemudahan penggunaan, memungkinkan penciptaan pengalaman *AR* interaktif yang dapat diakses melalui aplikasi reader mereka atau web *AR*, khususnya untuk konten berbasis *marker* (penanda).

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrich, C. (2009). *The complete guide to simulations and serious games: How the most valuable content will be created in the age beyond Gutenberg to Google*. John Wiley & Sons.
- Antonioli, M., Blake, C., & Sparks, K. (2014). *Augmented reality applications in education*. The Journal of technology studies, 96-107
- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). *Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature*. Educational research review, 20, 1-11
- Azuma, R. T. (2001). *Augmented reality: Approaches and technical challenges*. In Fundamentals of wearable computers and augmented reality (pp. 43-80). CRC Press
- Barron, B. J., Schwartz, D. L., Vye, N. J., Moore, A., Petrosino, A., Zech, L., & Bransford, J. D. (2014). *Doing with understanding: Lessons from research on problem-and project-based learning*. In Learning through problem solving (pp. 271-311). Psychology Press
- Billinghurst, M., & Duenser, A. (2012). *Augmented reality in the classroom*. Computer, 45(7), 56-63.
- Bolick, M.A.; Thomassen, M.; Apland, J.; Spencer, O.; Nicole, F.; Tran, S.K.N.; Voigt, M.; Lazar, K.B. (2024). *Project-Based Learning in Interdisciplinary Spaces: A Case Study in Norway and the United States. Educ*. Sci. 14, 866.
- Bonacci, Teresa. *"Unveiling the Defenses: A Current and Comprehensive Review of Coleoptera Carabidae Strategies*." Biology 14.6 (2025): 709.
- Borror, D. J., Triplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (1989). *An introduction to the study of insects* (No. Ed. 6, pp. 875-pp).
- Bruner, J. S. (2009). *The process of education*. Harvard university press.
- Capinera, J. L. (Ed.). (2008). *Encyclopedia of entomology*. Springer Science & Business Media.
- Carreon, A., Smith, S. J., & Rowland, A. (2020). *Augmented reality: Creating and implementing digital classroom supports.* Journal of Special Education Technology, 35(2), 109-115.
- Chen, L., Shi, Y., Wang, K., Sun, Y., & Hao, Y. (2024). *Morphology of the Mouthparts of Ladybeetle Vibidia duodecimguttata (Coleoptera: Coccinellidae), with Emphasis on Their Sensilla. Insects, 15(11), 854.*
- Coleman, D. C., Callaham, M. A., & Crossley Jr, D. A. (2017). *Fundamentals of soil ecology*. Academic press.

- Craig, A. B. (2013). *Understanding augmented reality: Concepts and applications.*
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches.* Sage publications.
- Dewi, P. S., & Kuswanto, H. (2023). *Developing an augmented reality-assisted e-module based on local wisdom of pedicabs for physics teaching.* Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 9(4), 1909-1915.
- Di Giulio, A., Muzzi, M., & Romani, R. (2015). *Functional anatomy of the explosive defensive system of bombardier beetles (Coleoptera, Carabidae, Brachininae).* Arthropod Structure & Development, 44(5), 468-490. https://doi.org/10.1016/j.asd.2015.08.013
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Scott, P., & Mortimer, E. (1994). *Constructing scientific knowledge in the classroom.* Educational researcher, 23(7), 5-12.
- Dunleavy, M., & Dede, C. (2013). *Augmented reality teaching and learning. Handbook of research on educational communications and technology*, 735.
- Hao, Y. N., Sun, Y. X., & Liu, C. Z. (2020). *Functional morphology of the mouthparts of lady beetle Hippodamia variegata (Coleoptera: Coccinellidae), with reference to their feeding mechanism.* Zoomorphology, 139(2), 199-212.
- Hopkins, R. (1993). *David Kolb's experiential learning machine.* Journal of Phenomenological Psychology, 24(1), 46-62.
- Ilobinso, A., Lowell, V., White, S., & Jones, K. (2025). *Augmented Reality for Active Learning: Exploring Preservice Teachers' Learning Experiences and Future Use Considerations*. Journal of Technology and Teacher Education, 33(2), 399-440.
- Johnson, L., Adams, S., & Cummins, M. (2012). *Technology outlook for Australian tertiary education 2012-2017: An NMC Horizon Report regional analysis (pp. 1-23).* The New Media Consortium.
- Jonassen, D. H., & Rohrer-Murphy, L. (1999). *Activity theory as a framework for designing constructivist learning environments.* Educational technology research and development, 47(1), 61-79.
- Kim, K., Hwang, J., Zo, H., & Lee, H. (2016). *Understanding users' continuance intention toward smartphone augmented reality applications.* Information development, 32(2), 161-174.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). *Importance of pollinators in changing landscapes for world crops.* Proceedings of the royal society B: biological sciences, 274(1608), 303-313.
- Kogan, M. (1998). *Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments.* Annual review of entomology, 43(1), 243-270.

- Kolb, D. A. (2014). Experiential learning: Experience as the source of learning and development. FT press.
- Land, S., & Jonassen, D. (2012). Theoretical foundations of learning environments. Routledge.
- Larmer, J., Mergendoller, J., & Boss, S. (2015). *Setting the standard for project based learning*. Ascd.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press.
- Lee, K. (2012). *Augmented reality in education and training*. TechTrends,
- 56(2), 13-21.
- Liebherr, J. K. (2016). *Cyphocoleus Chaudoir (Coleoptera, Carabidae, Odacanthini): descriptive taxonomy, phylogenetic relationships, and the Cenozoic history of New Caledonia.* Deutsche Entomologische Zeitschrift, 63(2), 211-270.
- Mager, R. F. (1965). *A universal objective*. NSPI Journal, 4(5), 3-6.
- Majid, A. (2014). *Implementasi kurikulum 2013 kajian teoretis dan praktis*.
- Markham, T., Larmer, J., & Ravitz, J. (2003). *Project based learning handbook: A guide to standards-focused project based learning for middle and high school teachers.*
- Marzano, R. J., Pickering, D., & McTighe, J. (1993). *Assessing student outcomes: Performance assessment using the dimensions of learning model.* Association for Supervision and Curriculum Development, 1250 N. Pitt St., Alexandria, VA 22314 (Stock Number 611-93179, $13.95).
- Mayer, R. E., Heiser, J., & Lonn, S. (2001). *Cognitive constraints on multimedia learning: When presenting more material results in less understanding.* Journal of educational psychology, 93(1), 187.
- Metcalf, R. L., & Luckmann, W. H. (Eds.). (1994). *Introduction to insect pest management.* John Wiley & Sons.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995). *Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum.* In Telemanipulator and telepresence technologies (Vol. 2351, pp. 282-292).
- Oemar Hamalik. 2014. *Kurikulum dan Pembelajaran*. Jakarta: Bumi Aksara
- Pan, H., Liu, B., Jaworski, C. C., Yang, L., Liu, Y., Desneux, N., ... & Lu, Y. (2020). *Effects of aphid density and plant taxa on predatory ladybeetle abundance at field and landscape scales.* Insects, 11(10), 695.
- Pedigo, L. P. (1996). *Entomology and pest management (No. Ed. 2, pp. xxii+-679).*
- Pfeffer, S. E., Wahl, V. L., Wittlinger, M., & Wolf, H. (2019). *High-speed locomotion in the Saharan silver ant, Cataglyphis bombycina*. Journal of

Experimental Biology, 222(20), jeb198705.

- Prensky, M. (2003). *Digital game-based learning*. Computers in entertainment (CIE), 1(1), 21-21.
- Radu, I. (2014). *Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis*. Personal and ubiquitous computing, 18(6), 1533-1543.
- Reeve, J., & Peerbhoy, D. (2007). *Evaluating the evaluation: Understanding the utility and limitations of evaluation as a tool for an organizational learning*. Health Education Journal, 66(2), 120-131.
- Reigeluth, C. M. (1999). *Instructional-design theories and models: A new paradigm of instructional theory*
- Salata, S., Demetriou, J., Georgiadis, C., & Borowiec, L. (2023). *The ant genus Cataglyphis Förster (Hymenoptera: Formicidae) in Cyprus.* Zootaxa, 5264(3), 301-322.
- Salerno, G., Rebora, M., Piersanti, S., Saitta, V., Gorb, E., & Gorb, S. (2023). *Coleoptera claws and trichome interlocking.* Journal of Comparative Physiology A, 209(2), 299-312.
- Savery, J. R. (2015). *Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions.* Essential readings in problem-based learning: Exploring and extending the legacy of Howard S. Barrows, 9(2), 5-15.
- Schön, D. A. (2017). *The reflective practitioner: How professionals think in action. R*outledge.
- Schon, D. A., & DeSanctis, V. (1986). *The reflective practitioner: How professionals think in action.*
- Service, M. W. (2012). *Medical entomology for students.*
- Shandilya, A., Singh, S., Mishra, G., Protasov, A., & Kaspi, R. (2024). *Ladybirds: biocontrol agents.* In Biocontrol agents for improved agriculture (pp. 435-475). Academic Press.
- Singh, R., Seneviratne, L., & Hussain, I. (2025). *Robust pollination for tomato farming using deep learning and visual servoing.* Robotica, 43(1), 86–109. doi:10.1017/S0263574724001243
- Sumarwiyah, Edris Zamroni, & Masturi. (2021). *Experiential learning with local wisdom: Prelimenary Study for Improving Analytical Thinking Ability.* ANP Journal of Social Science and Humanities , 2(2), 145-150. https://doi.org/10.53797/anp.jssh.v2i2.20.2021
- Stufflebeam, D. L. (2000). *The CIPP model for evaluation.* In Evaluation models: Viewpoints on educational and human services evaluation *(pp. 279-*

317). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Thomas, J. W. (2000). *A review of research on project-based learning.*
- Tucker, P. D., & Stronge, J. H. (2005). *Linking teacher evaluation and student learning*. ASCD.
- Tyler, R. W. (1942). *General statement on evaluation.* The Journal of Educational Research, 35(7), 492-501.
- Van Der Woude, R., Fitski, M., van der Zee, J. M., van de Ven, C. P., Bökkerink, G. M., Wijnen, M. H., ... & van der Steeg, A. F. (2024). *Clinical Application and Further Development of Augmented Reality Guidance for the Surgical Localization of Pediatric Chest Wall Tumors.* Journal of Pediatric Surgery, 59(8), 1549-1555.
- Vogel, H., Rügen, N., Wielsch, N., Twyman, R. M., Tonk-Rügen, M., & Vilcinskas, A. (2025). *Molecular basis of the explosive defence response in the bombardier beetle Brachinus crepitans.* Royal Society Open Science, 12(5), 241823.
- Wiggins, G. P., & McTighe, J. (2005). *Understanding by design.* ASCD.
- Willot, Q., Simonis, P., Vigneron, J. P., & Aron, S. (2016). *Total internal reflection accounts for the bright color of the Saharan silver ant.* PLoS One, 11(4), e0152325.
- Yancey, K. B. (1999). *Looking back as we look forward: Historicizing writing assessment.* College Composition & Communication, 50(3), 483-503.
- Yayu, I., Hizqiyah, N., & Nurhadi, M. (2019). *Developing Habits of Mind through Web Based Learning Approach.* 253(Aes 2018), 312–316.
- Yin, R. K. (2009). *Case study research: Design and methods* (Vol. 5). sage.
- Ziden, A. A., Ziden, A. A. A., & Ifedayo, A. E. (2022). *Effectiveness of augmented reality (AR) on students' achievement and motivation in learning science.* Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 18(4), em2097.
- Zimmerl, M., van Nieuwenhoven, R. W., Whitmore, K., Vetter, W., & Gebeshuber, I. C. (2024). *Biomimetic Cooling: Functionalizing Biodegradable Chitosan Films with Saharan Silver Ant Microstructures.* Biomimetics, 9(10), 630.



Penerbit
CV. Kimfa Mandiri
JL. Raya Ciapus Rt 01 Rw 06 Desa. Ciapus/Kec. Bar[illegible] Kab.Bandung 40377
Telp: 022-85945637 – 085314983618 – 081[illegible]16826
Website: kimfamandiri.or.id
E-mail: kimfamandiriks[illegible]

ISBN 978-634-7487-02-5