

3. Fisiologi organ dalam serangga

3.1. Otot dan pergerakan

Keberhasilan serangga dalam survivalnya terutama berkaitan dengan kemampuannya untuk mengindra, menafsirkan dan bergerak dalam lingkungannya. Sekitar tujuh puluh persen dari spesies di dalam biosfer adalah serangga yang tersebar di berbagai lingkungan. Kemampuan terbang serangga yang diperkirakan berkembang sejak paling sedikit 300 juta tahun yang lalu merupakan inovasi dalam kemampuan pergerakan selain pergerakan terestrial dan akuatik yang berkembang dengan baik.

Kekuatan untuk pergerakan berasal dari *otot*, yang bekerja dengan bertumpu pada sistem skeleton baik berupa eksoskeleton yang kokoh maupun skeleton hidrostatik.

3.1.1. Otot

Tidak seperti vertebrata dan invertebrata non-serangga yang mempunyai baik otot lurik (*striated*) maupun otot polos (*smooth*), serangga hanya mempunyai otot lurik yang masing-masing serabutnya terdiri dari dari beberapa sel dengan:

- suatu plasma membran bersama
- sarcolemma: lapisan luar. Sarcolemma mempunyai lekukan ke dalam (invaginasi), di mana tracheole yang mencatu oksigen berhubungan dengan serabut otot.
- contractile myofibrils: tersusun sepanjang serabut otot dalam lembaran yang terdiri dari silinder-silinder.

3.1.2. Perlekaan otot

Pada vertebrata, otot-otot bertumpu pada skeleton internal, tetapi sebaliknya pada serangga otot-otot melekat dan bertumpu pada permukaan dalam dari skeleton luar.

otot }
skeleton luar } bersambung dengan adanya tonofibrillae.

Tonofibrillae merupakan serabut-serabut penghubung yang halus berfungsi untuk:

- menghubungkan ujung otot ke lapisan epidermal.
- Terbuang bersama kutikula lama pada setiap moulting sehingga harus ada pembentukan tonofibrillae baru kembali.

Pada tempat perlekatan, tonofibrillae melintas epidermis dari otot ke kutikula. Kadang-kadang, perlekatan ini diperkuat dengan tonjolan multiselular yang disebut *apodeme* dan apabila struktur ini berbentuk memanjang disebut *apophysis*.

Pada beberapa serangga, misalnya larvae yang bertubuh lunak, pada umumnya mempunyai kutikula yang tipis dan lentur sehingga tidak mungkin untuk tumpuan gerak otot kecuali mendapat tambahan kekuatan.

- isi tubuh dan haemolymph
 - kontraksi otot-otot turgor yang silang-siur
- } turgiditas → hydrostatic skeleton

3.1.3. Merayap, menggeliat, berenang, berjalan dan meloncat

- **Larvae dengan tubuh lunak** bergerak dengan cara merayap. Pergerakan ini dimungkinkan karena adanya skeleton hidrostatik untuk perlekatan otot. Otot-otot turgor berkontraksi dan relaksasi secara berurutan dari kepala ke ekor sehingga membentuk gelombang. Tumpuan pada substrat terjadi karena adanya kait mulut (*mouth hook*, misalnya pada larva diptera) dan kaki lengket (*adhesive foot*). Beberapa serangga air bergerak dengan menggeliat seperti ular. Sedangkan pada larvae yang mempunyai kaki-kaki dada (*thoracic legs*), gelombang kontraksi dan relaksasi dari otot-otot turgor dari posterior ke anterior menyebabkan terangkatnya kaki dari substrat secara berurutan dan menyebabkan gerakan maju.
- **Pada serangga dengan eksoskeleton luar yang kokoh**, pergerakan diperoleh dari kontraksi dan relaksasi dari pasangan otot-otot antagonistik dan agonistik yang melekat pada kutikula. Pergerakan dengan jalan atau berlari menggunakan enam kaki dada. Dibanding crustacea dan myriapoda, serangga mempunyai lebih sedikit kaki yang terletak lebih ke ventral dan berdekatan satu sama lain pada dada memungkinkan konsentrasi otot-otot pergerakan baik untuk berjalan maupun terbang. Hal ini menghasilkan pergerakan yang lebih efisien dan lebih mudah terkontrol. Ketika serangga berjalan, pergantian pertumpuan tripod dari kaki depan dan kaki belakang pada satu sisi dan kaki tengah pada sisi yang lain mendorong ke belakang sedangkan kaki-kaki yang lain diangkat ke depan sehingga menghasilkan gerakan maju. Dengan tripod, pergerakan menjadi stabil karena titik berat tubuh berada di antara tiga kaki.

- **Meloncat**

Gerakan meloncat dimungkinkan karena adanya kaki belakang yang termodifikasi (femur belakang yang membesar, misalnya pada orthoptera dan kutu) dengan otot-otot yang besar di mana kontraksi secara perlahan menghasilkan energi yang tersimpan dengan salah satu cara berikut ini:

- distorsi dari sendi femoro-tibial atau
- sklerotisasi berbentuk pegas (spring-like sclerotization, misalnya perpanjangan jaringan pengikat pada metatibia)
- tekanan pada elastic resilin pada coxa.

- **Mendayung**

Gerakan mendayung pada lapisan permukaan air dimungkinkan karena adanya tegangan permukaan air dan pada telapak kaki serangga terdapat kutikula atau rambut-rambut yang bersifat menolak air.

3.1.4. Terbang

Kemampuan terbang memungkinkan serangga untuk mempunyai mobilitas lebih tinggi yang membantu dalam memperoleh pakan, pasangan kawin, penyebaran dan mengeksploitasi lingkungannya. Kemampuan terbang hanya dimiliki oleh serangga dewasa. Terbang berarti harus melawan dua gaya yaitu gravitasi dan gesekan dengan udara.

Penerbangan bisa dilakukan secara aktif menggerakkan otot-otot terbang atau secara pasif atau melayang relatif terhadap angin. Naik dan turun dalam gerakan melayang dilakukan dengan mengatur sudut sisi depan sayap yaitu antara 30° dan 50°. Kemampuan manuver serangga ini lebih baik dari pada pesawat terbang yang hanya kurang dari 20°.

Frekuensi pergerakan sayap berbeda dari spesies ke spesies, misalnya pada kupu-kupu 5 Hz (5 kali/detik) sedangkan pada lebah 10 Hz. Untuk berbelok, serangga merubah amplitudo gerakan pada salah satu sisi sayap.

Ditinjau dari hubungannya dengan sayap, otot terbang ada dua macam yaitu otot langsung dan otot tidak langsung. Otot langsung mempunyai perlekatan dengan sayap dan bekerja secara langsung menggerakkan sayap. Otot tidak langsung melekat

pada dinding thorax bagian dalam dan kontraksinya menyebabkan perubahan bentuk dada dan secara tidak langsung menggerakkan sayap.

3.3. Sistem endokrin

Hormon adalah zat kimia yang dihasilkan di dalam tubuh suatu organisme dan diangkut, umumnya di dalam cairan tubuh, dari tempat di mana ia disintesis ke tempat di mana ia mempengaruhi berbagai proses fisiologis, walaupun keberadaanya dalam jumlah yang sangat sedikit.

3.3.1. Pusat endokrin:

Hormon diproduksi oleh:

- neuronal
- neuroglandular
- glandular
- ovarium
- beberapa jaringan yang khusus untuk suatu pengaturan endokrin

Sel-sel neurosekretori

Sel-sel neurosekretori adalah sel-sel syaraf yang mengalami modifikasi dan terdapat pada berbagai sistem syaraf (di dalam CNS, sistem syaraf perifer dan sistem syaraf stomodeal), tetapi yang terbanyak terdapat di dalam otak. Sel-sel ini menghasilkan neurohormone yang mengatur sintesis dan sekresi hormone ecdysteroids dan hormon juvenile.

Corpora cardiaca

Corpora cardiaca adalah sepasang kelenjar neuroglandular yang terletak pada kedua sisi dari aorta dan di belakang otak. Mereka menimbun dan mensekresi neurohormon, termasuk prothoracicotropic hormone (PTTH), yang berasal dari NSC dari otak, juga menghasilkan neurohormon sendiri. PTTH merangsang aktivitas sekresi dari kelenjar prothoracic.

Kelenjar prothoracic

Kelenjar prothoracic adalah kelenjar yang panjang, berpasangan terletak di dalam thorax atau di belakang kepala; pada cyclorrhaphous Diptera mereka adalah bagian dari kelenjar cincin, yang padanya juga terdapat corpora cardiaca dan corpora allata. Kelenjar prothoracic mensintesis dan mensekresi ecdysteroid, umumnya ecdysone (moulting hormone) yang setelah mengalami hidroksilasi menyebabkan dimulainya moulting pada epidermis.

Corpora allata

Corpora allata adalah sepasang kelenjar yang merupakan derivat dari epithelium dan terletak pada kedua sisi dari usus depan. Pada beberapa serangga, mereka bergabung membentuk kelenjar tunggal. Corpora allata mensintesis dan mensekresi juvenile hormone (JH) yang berfungsi untuk mengatur baik metamorphosis maupun reproduksi.

Hormon:

ecdysteroids adalah istilah umum untuk hormon-hormon steroid yang mempunyai aktivitas merangsang moulting. Ecdysteroid disintesis dari kolesterol. Oleh karena serangga tidak mampu mensintesis kolesterol *de novo*, maka zat ini didapatkan dari makanannya. Setelah disintesis di dalam kelenjar prothoracic, ecdysone disekresikan ke haemolymph dan di dalam jaringan target mengalami hidroksilasi dan menjadi hormone yang aktif yaitu 20-OH-ecdysone (20-hydroxyecdysone). Ecdysone juga dihasilkan oleh ovarium dan berfungsi untuk pematangan sel-sel telur yaitu terutama dalam proses pembentukan yolk (vitellogenesis).

Juvenile hormones

Secara kimia juvenile hormone tergolong dalam keluarga sesquiterpenoid → JH I, JH II, JH III, JH0

Fungsi JH adalah:

- dalam perkembangan, JH berfungsi dalam mengendalikan moulting dan metamorphosis.
- dalam reproduksi JH berfungsi dalam mengendalikan penimbunan yolk, aktivitas kelenjar accessory dan produksi pheromone.

Neurohormon

Neurohormon pada umumnya termasuk peptida sehingga sering disebut neuropeptida. Hormon-hormon ini berfungsi dalam perkembangan, homeostasis, reproduksi dan metabolisme.

3.4. Sistem sirkulasi

Sistem sirkulasi pada serangga terdiri dari jantung yang hanya merupakan pembuluh dorsal dengan pergerakan peristaltik untuk memompa darah atau haemolymph.

Haemolymph pada nympha dan imago mempunyai proporsi kurang dari 20% berat tubuh sedangkan pada larvae berbadan lunak, proporsi haemolymph lebih besar yaitu 20 – 24% berat tubuh dan berfungsi juga sebagai skeleton hidrostatik.

Haemolymph yang terdiri dari larutan berair, ion-ion anorganik, lipid, gula (trehalose), asam amino, protein, asam organik dan sel-sel darah berfungsi untuk pertukaran zat antar jaringan, mengangkut hormon dan nutrien dari usus ke jaringan dan barang buangan dari jaringan ke organ ekskretori. Perubahan pada tekanan haemolymph akan diteruskan ke tracheae dan menyebabkan ventilasi dan pada saat moulting, tekanan haemolymph menyebabkan pecahnya kutikula lama dan mengembangnya kutikula baru. Oleh karena komponen utamanya adalah air maka haemolymph berfungsi juga sebagai tempat cadangan air dan dengan kapasitas panas yang tinggi dan dengan sirkulasi, haemolymph berfungsi untuk pengaturan suhu tubuh (*thermoregulation*). Kandungan yang tinggi asam-asam amino dan phosphat organik adalah ciri khas haemolymph serangga yang mungkin berhubungan dengan perlindungan terhadap suhu dingin.

Semua sel darah (haemocytes) serangga berinti dan berfungsi untuk phagocytosis yaitu menelan partikel dan metabolit, parasit, material asing, dan pembekuan darah serta penyimpanan dan distribusi nutrien.

3.5. Sistem trachea dan pertukaran gas

Serangga adalah hewan aerobik yaitu membutuhkan oksigen dan membuang CO₂ sebagai hasil respirasi sel. Udara masuk melalui spiracle yang mempunyai diameter

kurang dari 1mm. Tracheae berhubungan langsung dengan jaringan yang melakukan respirasi dan sel-sel yang mereka catu.

Difusi dan ventilasi

Perjalanan oksigen dari udara melalui spiracle, tracheae, tracheoles sampai target cells, dengan kombinasi ventilasi dan difusi sepanjang gradien konsentrasi (tinggi di luar, rendah di dalam jaringan) sehingga O₂ masuk, CO₂ dan uap air keluar. Dengan demikian harus ada kompromi antara O₂ tetap bisa masuk tapi kehilangan air melalui spiracle harus diminimalkan. Keseimbangan ini diatur dengan membuka spiracle secara periodik manakala dibutuhkan dan menutupnya ketika serangga sedang tidak aktif. Pada serangga yang sedang aktif, gerakan pada thorax dan abdomen merupakan pompa yang memventilasi bagian luar dari sistem trachea, sehingga lintasan difusi menjadi lebih pendek. Serangga yang hidup di lingkungan kering mempunyai spiracle yang kecil dengan atria yang dalam. Beberapa serangga mempunyai tracheae yang besar dan berfungsi sebagai tempat cadangan O₂ ketika spiracle tertutup. Pada holometabola yang tidak mempunyai kantung udara, difusi adalah mekanisme utama pergerakan gas. Efisiensi dari pertukaran gas berhubungan dengan jarak dan diameter tracheae. Pembukaan dan penutupan spiracle secara terkoordinir menyertai gerakan ventilasi menghasilkan gerakan udara satu arah pada trachea utama. Spiracle anterior terbuka ketika inspirasi dan trachea posterior terbuka ketika ekspirasi.

Serangga mempunyai batas atas ukuran tubuh. Apabila O₂ harus berdifusi melalui jarak yang terlalu jauh, maka kebutuhan O₂ tidak akan terpenuhi. Apabila gerakan ventilasi ditingkatkan, maka kehilangan air akan meningkat pula. Oleh karena itu, serangga besar mempunyai tubuh yang langsing dan panjang untuk mengurangi jarak difusi.

3.6. *Pencernaan dan nutrisi*

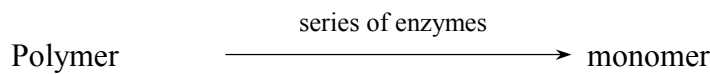
3.6.1. *Saliva dan pencernaan makanan*

Sekresi saliva berfungsi untuk pada umumnya untuk melarutkan dan mengatur pH makanan yang masuk. Selain itu saliva juga mengandung enzyme-enzyme pencernaan dan anticoagulant pada serangga penghisap darah. Pada Hemiptera predator, saliva yang mengandung enzyme pencernaan dikeluarkan pada mangsanya dan setelah

tercerna dan mencair baru dihisap. Pada serangga penghisap cairan, otot-otot dilator menempel pada dinding pharynx atau ruang preoral membentuk pompa untuk, mengeluarkan saliva, menghisap cairan, dan udara ketika moulting untuk mengembangkan kutikula.

3.6.2. Pencernaan makanan

Proses pencernaan makanan terutama terjadi di dalam midgut di mana sel-sel epitelium menghasilkan enzyme-enzyme pencernaan dan juga menyerap makanan yang sudah dicerna.



3.6.3. Fat body

Fat body mempunyai berbagai fungsi metabolik yaitu untuk metabolisme karbohidrat, lipid dan senyawa-senyawa N. Selain itu, fat body juga berfungsi sebagai tempat penimbunan glikogen, lipid dan protein, serta sintesis pengaturan gula darah dan haemolymph protein (haemoglobins, vitellogenins).

Fat body mampu merubah aktivitasnya sebagai response terhadap isyarat yang bersifat nutrisi dan hormonal dalam mencatu kebutuhan pertumbuhan, metamorphosis dan reproduksi.

Sel-sel di dalam fat body mempunyai type yang berbeda-beda sesuai dengan fungsinya:

- *tropocytes* untuk penimbunan zat dan metabolisme.
- *urocytes* untuk menyimpan sementara dan mendaur-ulang asam urat.
- *mycetocytes* mengandung bakteri simbiotik.

3.6.4. Nutrisi dan mikroorganisme

Beberapa serangga seperti hemiptera penghisap cairan tumbuhan, pemakan kayu (rayap), kecoa, semut, bersimbiosis dengan mikroorganisme baik intra maupun ekstraselular. Serangga predator pada umumnya tidak mempunyai simbiot. Mikroorganisme tersebut disebut simbiot karena mereka tergantung dari serangga inangnya. Mereka termasuk bakteri, yeast, fungi bersel tunggal atau protista dan

diduga berperan dalam nutrisi dari inangnya dengan membantu dalam sintesis dan/atau metabolisme sterol, vitamin, karbohidrat dan asam amino.

Perpindahan mikroorganisme dari induk ke keturunannya bisa melalui oral yaitu dengan kapsul berisi mikroorganisme yang diletakkan bersama telur. Cara lain yaitu transovarial yaitu melalui ovarium ke keturunannya.

Beberapa jenis semut (Formicidae) mampu untuk membudidayakan jamur. Semut makan jamur yang tumbuh pada daun-daun yang mereka kumpulkan di dalam sarangnya (fungus garden).

3.7. Sistem ekskretori

Ekskresi yaitu proses pembuangan limbah hasil metabolisme dari dalam tubuh terutama senyawa N untuk mencegah keracunan, mempertahankan Na^+ , K^+ , dan Cl^- yang terbatas dalam makanan, atau hilang karena berdifusi ke dalam lingkungannya pada serangga air. Dengan menghasilkan urine dan frass komposisi tekanan osmosis cairan tubuh dapat dipertahankan. Ekskresi dan osmoregulasi dilakukan oleh Malpighian tubules dan usus belakang. Osmoregulasi pada serangga air tawar dilakukan oleh sel-sel chlorida yang berasosiasi dengan usus belakang dengan menyerap ion-ion anorganik.

3.7.1. Cara kerja sistem ekskretori pada serangga

- Malpighian tubules menghasilkan filtrat yang bersifat isosmotik dari haemolymph yang mempunyai kandungan ion K^+ yang tinggi, Na^+ yang rendah dan Cl^- sebagai anion utama.
- Transport ion secara aktif, terutama K^+ , ke dalam lumen dari Malpighian tubules menghasilkan gradien osmotik dan menyebabkan air berdifusi secara pasif ke dalam lumen. Gula dan kebanyakan asam amino secara pasif tersaring dari haemolymph. Gula (sukrose dan trehalose) diserap kembali dari lumen ke dalam haemolymph. Semua proses ini menghasilkan urine yang kemudian dicurahkan ke dalam usus.
- Di dalam rectum, urine dimodifikasi dengan membuang zat-zat terlarut dan air untuk menjaga keseimbangan cairan dan ion-ion (*homeostasis*) di dalam tubuh serangga. Sel-sel khusus di dalam rectal pad melakukan penyerapan kembali ion Cl^- secara aktif atas pengaruh hormone. Proses in

menyebabkan gradien elektrik dan osmotik yang menyebabkan penyerapan kembali ion-ion yang lain, air, asam-asam amino dan asetat.

3.7.2. Ekskresi Nitrogen

Pada serangga pemakan darah, kelebihan N diekskresikan dalam bentuk ammonia pada yang hidup di air dan sebagai asam urat, urea, pteridine, hypoxanthine, allantoin, dan asam allantoinat pada serangga terrestrial. Ammonia adalah senyawa toxic, oleh karena itu, ia harus diekskresikan melalui urine, faeces atau diuapkan melalui kutikula misalnya pada kecoa.

4. Sistem sensory

Keberhasilan serangga disebabkan oleh kemampuannya untuk mengindera dan menafsirkan, mengidentifikasi dan merespon secara selektif terhadap signal/rangsangan dari lingkungan sekitarnya serta kemampuannya mengidentifikasi host dan faktor-faktor mikroklimat.

Signal yang diterima serangga bisa berupa stimuli mekanis, thermal, kimia, penglihatan atau bayangan.

4.1. Penginderaan stimuli mekanis

Penginderaan stimuli mekanis dapat dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu:

- penginderaan stimuli sentuhan (tactile mechanoreception)
- penginderaan stimuli mekanis posisi (position mechanoreception atau proprioception)
- penginderaan suara (sound reception)

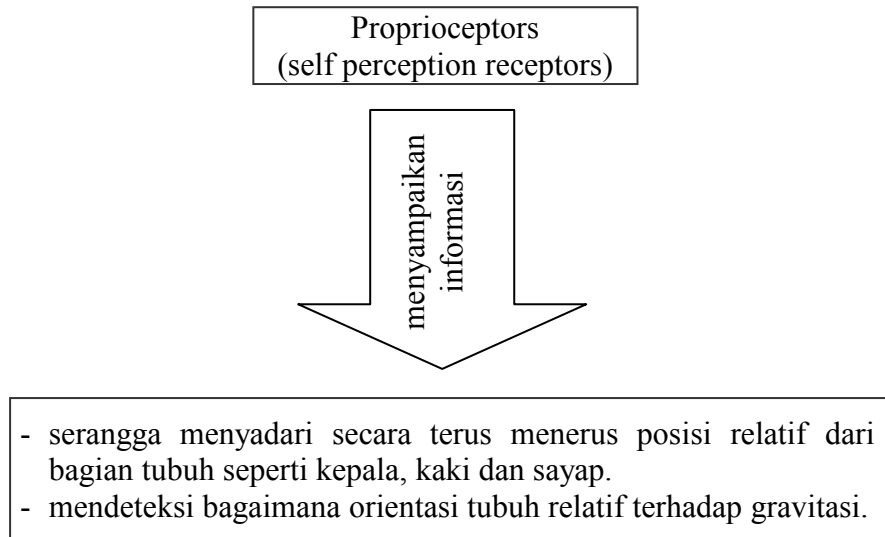
4.1.1. Penginderaan stimuli sentuhan (tactile mechanoreception)

Alat penerima (reseptor) rangsangan ini disebut trichoid sensillum yang terdiri dari:

- sel-sel trichogen yang menumbuhkan rambut berbentuk kerucut (conical hairs)
- sel-sel tormogen yang menumbuhkan socket
- sensory neuron menumbuhkan dendrite menuju rambut dan axon yang berhubungan dengan axon lain menuju CNS.

4.1.2. Penginderaan stimuli mekanis posisi mechanoreception (proprioception)

Alat penerima dalam penginderaan ini disebut proprioceptors (self perception receptors) dengan mekanisme kerja sebagai berikut



Macam-macam proprioceptors:

- *Hair plate* = sensila pada persendian dan leher yang berhubungan dengan kutikula di dekatnya.
- *Stretch receptors* = proprioceptor internal yang berhubungan dengan kontraksi otot seperti yang terdapat pada dinding usus. Receptor ini berfungsi untuk mendeteksi tegangan usus, kecepatan ventilasi trachea.
- *Stress detectors* pada kutikula, berupa campaniform sensillum yaitu sensillum berneuron tunggal terletak pada persendian kaki dan sayap, pada dasar haltere pada diptera, pada bagian dorsal dan ventral. Terdapat beberapa kelompok campaniform sensilla yang merespon terhadap distorsi pada persendian sayap ketika terbang.

4.1.3. Penginderaan bunyi

Bunyi adalah fluktuasi tekanan yang menyebabkan terjadinya gelombang getaran dan dihantarkan melalui udara atau substrat termasuk air. Serangga dapat mengindera suara frekuensi mulai dari 1 Hz (siklus per detik) sampai 100.000 Hz ultra suara

(ultrasound), suatu rentang frekuensi yang jauh lebih besar dibanding yang manusia mampu mengindera yaitu antara 20 dan 20.000 Hz.

Isyarat bunyi pada serangga berfungsi untuk komunikasi terutama dalam menemukan pasangan kawin. Jangkrik jantan menarik perhatian betina dengan mengeluarkan suara panggilan, sehingga betina lebih mudah untuk mendeteksi keberadaan jantan yang sudah siap untuk kawin. Selain itu, isyarat bunyi juga berfungsi untuk mendeteksi kehadiran predator misalnya kelelawar pemakan serangga yang menggunakan ultrasound.

Penginderaan getaran non-tympanal (tanpa membran)

Bentuk yang paling sederhana dari alat indera suara (getaran) misalnya yang terdapat pada ulat kobis *Barathra brassicae* yang berupa seperti rambut (trichoid sensilla) yang memanjang dan sangat peka. Alat ini mampu mendeteksi suara dengan frekuensi sekitar 150 Hz.

Organ khusus pengindera suara non-tympanal pada serangga dikenal dengan nama *chordotonal organs* atau *subcuticular mechanoreceptors* yang tersusun dari satu atau lebih scolopodia. Ada dua macam *chordotonal organ* yaitu *Johnston's organ* dan *subgenual organs*. *Johnston's organ* terletak pada segmen ke dua antena (pedicel) atau segmen ke tiga. Organ ini berfungsi untuk mengukur kecepatan terbang dengan mendeteksi gesekan dengan udara dan sebagai alat pendengar pada nyamuk (Culicidae) dan Chironomidae. Subgenual organ tersusun atas suatu setengah lingkaran yang terdiri dari banyak sel pengindera (*sensory cells*) di dalam haemocoel. Sel-sel ini pada satu ujungnya terhubung ke kutikula bagian dalam dari tibia dan ujung lainnya terhubung ke tracheae. *Subgenual organ* terdapat pada tibia dari setiap kaki. Organ ini mampu mendeteksi melalui kaki getaran (bunyi) yang dihantarkan melalui substrat dengan berbagai frekuensi.

Penginderaan bunyi secara tympanal

Penginderaan bunyi secara tympanal melibatkan suatu tympanum (membran) yang dapat merespon bunyi yang dihasilkan di tempat dengan jarak tertentu dan dihantarkan melalui udara (*air-borne vibration*). Membran tympanal berhubungan dengan *chordotonal organ* dan suatu kantung berisi udara. Kantung udara, yang

biasanya merupakan modifikasi dari tracheae, berfungsi untuk resonansi gelombang agar suara yang diterima menjadi lebih kuat.

Letak *tympanal organ* berbeda-beda dari kelompok serangga yang satu ke serangga yang lain misalnya:

- Ventral thorax, antara kaki-kaki metathorax (pada melalang sembah, mantids)
- Metathorax (pada ngengat malam, noctuid moths)
- Kaki-kaki prothorax (pada beberapa orthoptera)
- Abdomen (pada orthoptera yang lain, gareth po homoptera, ngengat lepidoptera dan kumbang coleoptera)
- Pangkal sayap (ngengat lepidoptera)
- Prosternum (lalat diptera)
- Cervical membranes (beberapa kumbang coleptera)

Gelombang bunyi yang sampai pada *tympanal organ* baik melalui udara maupun melalui substrat menyebabkan tympanum bergetar. Getaran tersebut akan diterima oleh tiga *chordotonal organ* yaitu *subgenual organ*, *intermediate organ* dan *crista acustica*. *Intermediate organ* menerima signal akustik dengan frekuensi 2 – 14 kHz sedangkan *crista acustica* yang terdiri dari sekitar 60 sel skolopodial menerima frekuensi sekitar 5 – 50 kHz. Walaupun masing-masing *chordotonal organ* mempunyai inervasi syaraf yang terpisah dan menerima gelombang dengan frekuensi yang berbeda-beda, tetapi signal-signal yang diterima oleh ketiga organ tersebut dapat diindra dan ditafsirkan secara terpadu. Hal ini dimungkinkan karena ketiga syaraf tersebut terhubung pada suatu titik.

4.1.4. Menghasilkan bunyi

Cara yang paling umum untuk menghasilkan suara pada serangga adalah dengan *stridulation* yaitu menggosokkan *scraper* terhadap *file*.

- The most common method in sound production is stridulation where a scraper is rubbed against another, the file.

File = a series of teeth, ridges or pegs which vibrate through contact with a ridged scraper. The file itself makes little noise, and amplification must be provided to generate sound.

e.g. horn shape burrows (mole cricket)

modified fore wings (tegmina) and internal sacs of the tracheal system.

The file of crickets is formed from a basal vein of one or both tegmina, and rasps against a scraper on the other wing.

- The other method is alternate muscular distortion and relaxation (more than one contractions per impulse) of elastic cuticle called tymbal. e.g. in cicadas, only male have, dorsolateral, one on each side, on the first abdominal segment.

4.2. Thermal stimuli

4.2.1. Thermoreception

- Function and location is poorly known. However, it is suggested that there are two locations:
 - antennal temperature sensing.
 - arolium and pulvilli of the tarsi (in cockroaches)

4.2.2. Thermoregulation

Insects are poikilothermic = lack of means to maintain homeothermy. However, insects can vary their body temperature by behaviour using:

- external heat (ectothermy)
- physiological mechanism (endothermy), predominantly from metabolism associated with flight because majority of the energy allocated for flight is converted into heat.

94% energy → heat
 6% energy → mechanical force on the wings.

Ectothermy:

- basking
- setae (in Lymantriidae) are used as insulator, while not impairing heat uptake.
- Burrowing, shade seeking behaviour.
- In aquatic insects, body temperature follows water temperature, lack of body temperature regulation beyond seeking microclimatic difference.

Endothermy:

- Thoracic muscle have very high metabolic rate and produce much heat.
- Butterflies and locusts alternate heat producing with gliding, which allows cooling.
- Bees and moths (cannot glide), prevent overheating by increasing heart rate to pump haemolymph to the abdomen that is poorly insulated.

4.3. Chemical stimuli

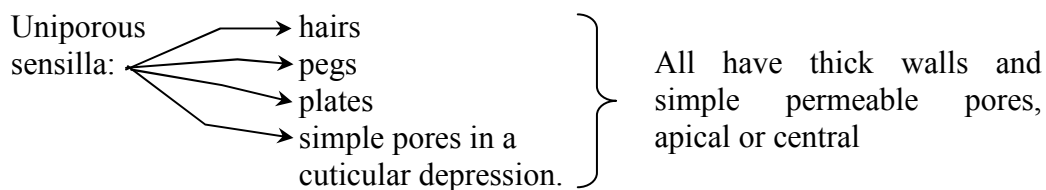
In comparison with vertebrates, insects shows more profound use of chemicals in communication, particularly with other individuals of their own species.

4.3.1. Chemoreception

There are two kinds of chemoreceptions:

- Taste = detection of aqueous chemicals, termed as gustatory.
- Smell = detection of air-borne gaseous chemicals, termed as olfactory.

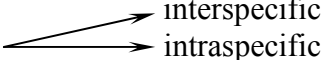
Chemoreceptors are sensilla → uniporous
 → multiporous



Multiporous sensilla: hair-like setae with many round pores leading to a chamber known as the pore kettle.

Very sensitive chemoreceptors are involved in chemical communication between conspecific species. Great sensitivity is achieved by spreading very many receptors over as great areas as possible. The antennae of a male *Bombyx mori* moth has ~ 17000 sensilla. Each sensillum has upto 3000 pores, thus, there are 45 million pores per moth. Just a few molecules of pheromone can stimulate a nerve impulse above the background rate, and a behavioral change may be elicited by less than 100 molecules of sex pheromone (Fig. 4.7).

4.3.2. Semiochemicals: pheromones

Semiochemicals = communication chemicals 

- *Intraspecific pheromones* = substances that are secreted to the outside by one individual and received by a second individuals of the same species in which they release a specific reaction.
- Pheromones are: mostly *volatile*, only some are liquid (contact chemicals).
- Pheromones are *produced by exocrine glands* derived from epidermal cells.
- *Location*: in Lepidoptera → between 8th and 9th abdominal segments
 - In female honeybee → mandibular
 - In Aphidae → swollen hind tibiae
 - In cockroaches → midgut and genitalia.

Sex pheromones:

- Used in mate location and courtship which may involve two stages:
 - Sex attraction pheromones acting at a distance (mostly by females). Increase in concentration → approach.
 - Courtship pheromones: employed prior to mating as aphrodisiac, e.g. in queen butterfly (Nymphalidae) males, as with several Lepidopteran have extrusible abdominal brush, which produce a pheromone (pyrrolizidine alkaloid = danaidone) that placate escape reaction of the female (Fig. 4.9).

Aggregation pheromones

Californian western pine beetles, *Dendroctonus brevicornis* (Scolitidae), attack *Pinus ponderosa*. On arrival at a new tree, colonizing females release a pheromone exobrevicornis + myrcene (terpene from damaged trees). Both sexes of this species are attracted by this mixture. Newly arrived males release another pheromone, frontaline. The aggregation of many pine beetles overwhelm the tree's defensive secretion resins.

Spacing pheromones

After the beetles mate on the tree, both sexes produce anti aggregation pheromone called verbenone and trans verbenone.

Trail marking pheromones

e.g. in ants.

Alarm pheromone

This pheromone is provoked by the presence of predators and a threat to the nest.

4.3.3. Semiochemical: kairomones, allomones and synomones

Kairomones:

Myrcene, the terpene produced by ponderosa pine when it is damaged by the western pine beetles, acts as synergist with aggregation pheromones that act to lure more beetles. Thus, myrcene can be a kairomone (a chemical that disadvantages the producer).

Allomones:

= chemicals that benefit the producer but have neutral effect on the recipients, e.g. defensive and repellent chemicals which advertise distastefulness and protect the producer from lethal experience by predators, e.g. Lycidae (beetle), including *Metriorrhyncus* that are protected by odorous alkylpyrazine allomones.

Synomones:

The terpene produced by damaged pine are kairomone for pest beetle, but if identical chemicals are used by beneficial parasitoids to locate and attack the bark beetles, the terpene are acting as a synomone.

Thus, if an insect-damaged host plant produce a repellent odour such as a volatile terpenoid, then the chemical could act as:

- an allomone that deters non-specialist phytophages.
- a kairomone that attracts a specialist phytophage.
- a synomone that lures the parasitoid of the phytophage.

4.4. Insect Vision

The basic components needed for vision are a lens to focus light onto photoreceptors – cells containing photosensitive molecules – and a nervous system with enough complexity to process visual information.

In insects, the photoreceptive structure is the *rhabdom*, consists of

- several adjacent retinula (nerve cells) and
- close packed microvilli containing visual pigment.

When light falls onto the *rhabdom*, the visual pigment changes its configuration, and this effect leads to a change in electrical potential across the cell membrane. This signal is transmitted via chemical synapses to the nerve cells in the brain.

4.4.1. Dermal detection

Through body surface, no optical system with focusing structure, but there are sensory receptors below the body cuticle.

- blind cave insects, decapitated cockroaches
- within the brain of aphidae there are light sensitive cells that detect day length.

4.4.2. Stemmata

Stemmata are the only visual organs of larval holometabolous insects.

- located on the head
- consist of cuticular lens. Light is focused by the lens onto a single *rhabdom* (Fig. 4.10.a)

4.4.3. Ocelli

Many adult insects, and some nymphs, have dorsal ocelli in addition of their compound eyes (Fig. 4.10.b).

- The ocelli integrate light over a large visual field.
- They very sensitive to very low intensities of light, but not for light resolution.
- They function as horizon detectors for control of roll and pitch movements in flight.
- Register cyclical changes in light intensity that correlate with diurnal behavioural rhythms.

4.4.4. Compound eyes

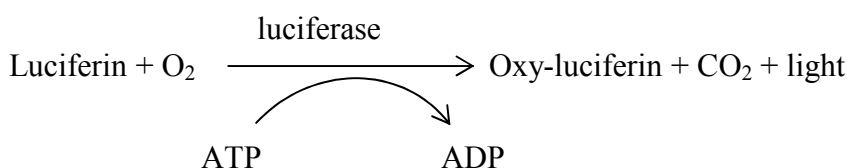
The most sophisticated insect visual organ is the compound eye. Virtually all adult insects and nymphs have a pair of large, prominent compound eyes, which often cover nearly 360 degrees of visual spaces.

The compound eye is based on repetition of many individual units called ommatidia. Each ommatidium resembles a simple stemma (Fig. 4.11): it has a cuticular lens overlying a crystalline cone, which directs and focuses light onto eight (or may be 6 – 10) elongate retinula cells. The retinula cells are clustered around the longitudinal axis

4.4.5. Light production (bioluminescence)

Some insects co-opt symbiotic luminescence bacteria or fungi, but self luminescence is found in a few Collembola, one Hemipteran (fulgorid lantern bug), a few dipteran fungus gnats and divers groups of several families of coleopterans (Pengodidae, Drilidae, and notable Elateridae and Lampryidae (firefly)).

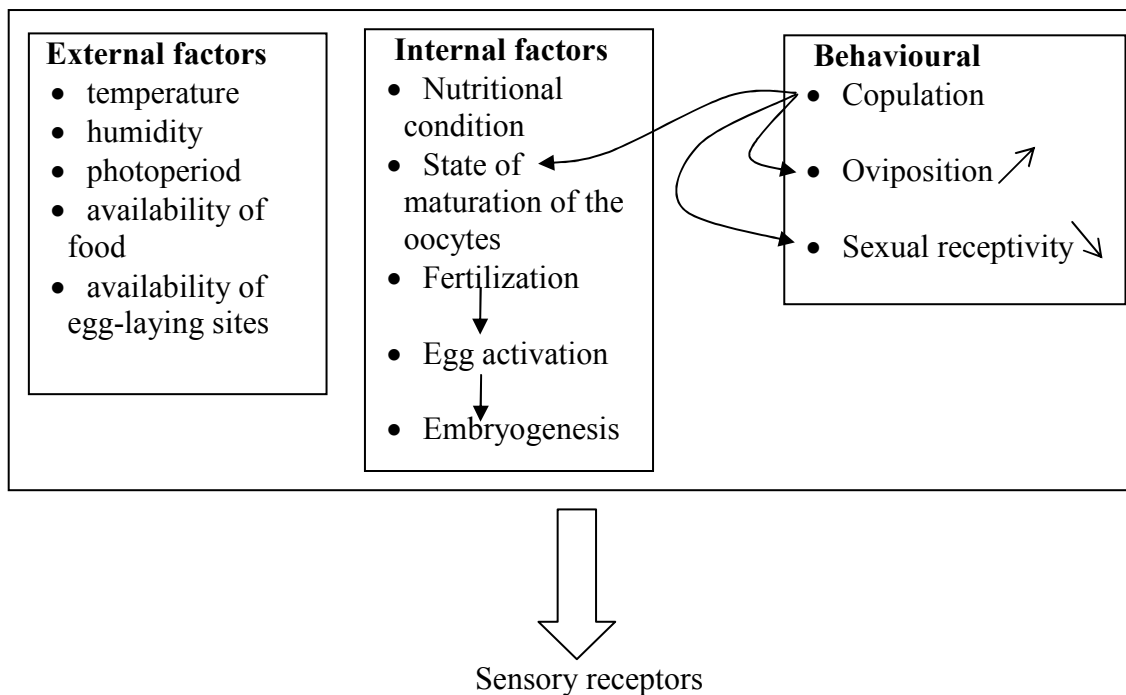
The enzyme luciferase oxidases substrate luciferin, in the presence of ATP and O₂

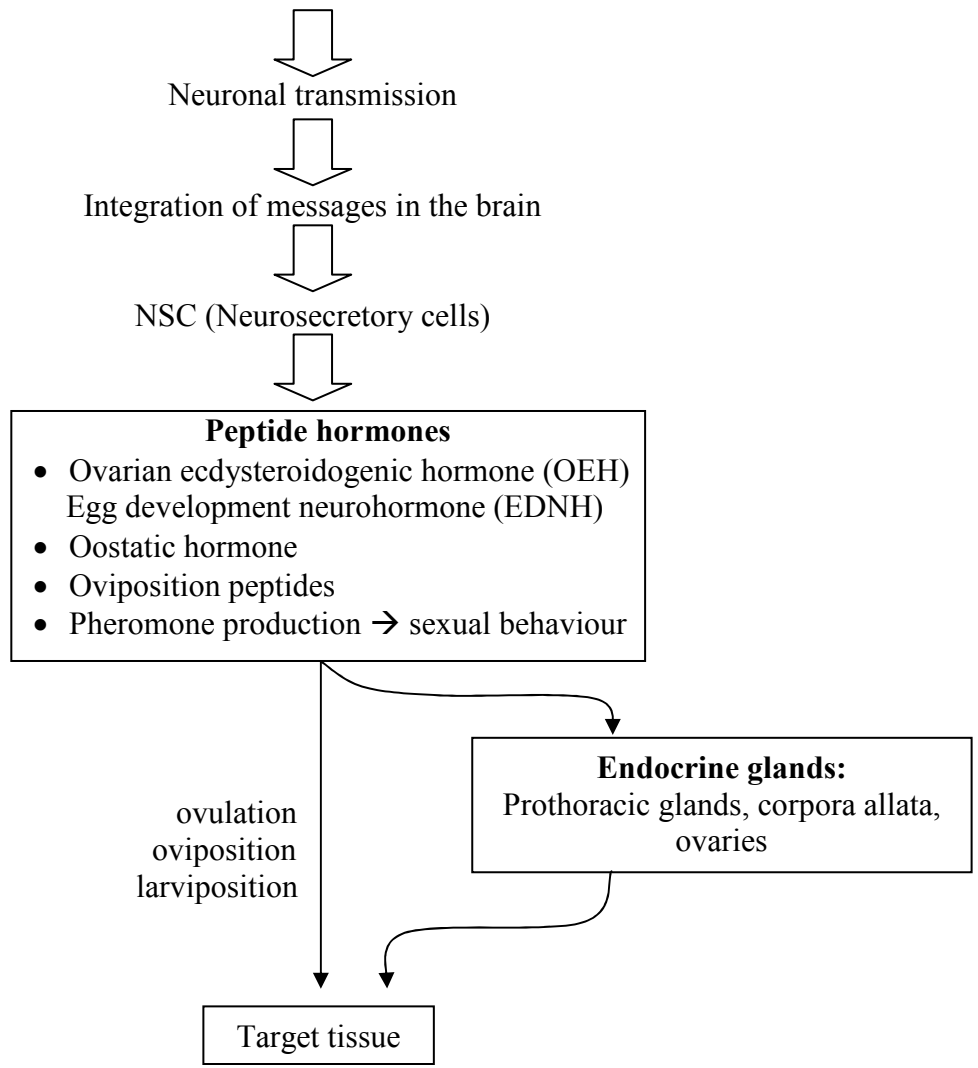


Variation in ATP release controls the rate of flashing,

Differences in pH may allow variation in frequency (color) of light emitted.

5.11. Physiological control of reproduction





Juvenile hormones and / or ecdysteroids are essential to most stages of reproduction:

JH → triggers the functioning of organs

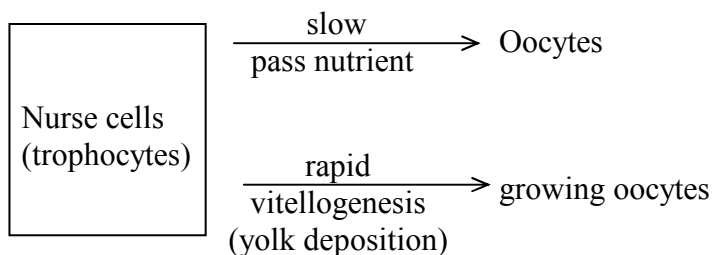
- ovaries
- accessory glands
- fat body

Ecdysteroids → influence

- morphogenesis
- Gonad function

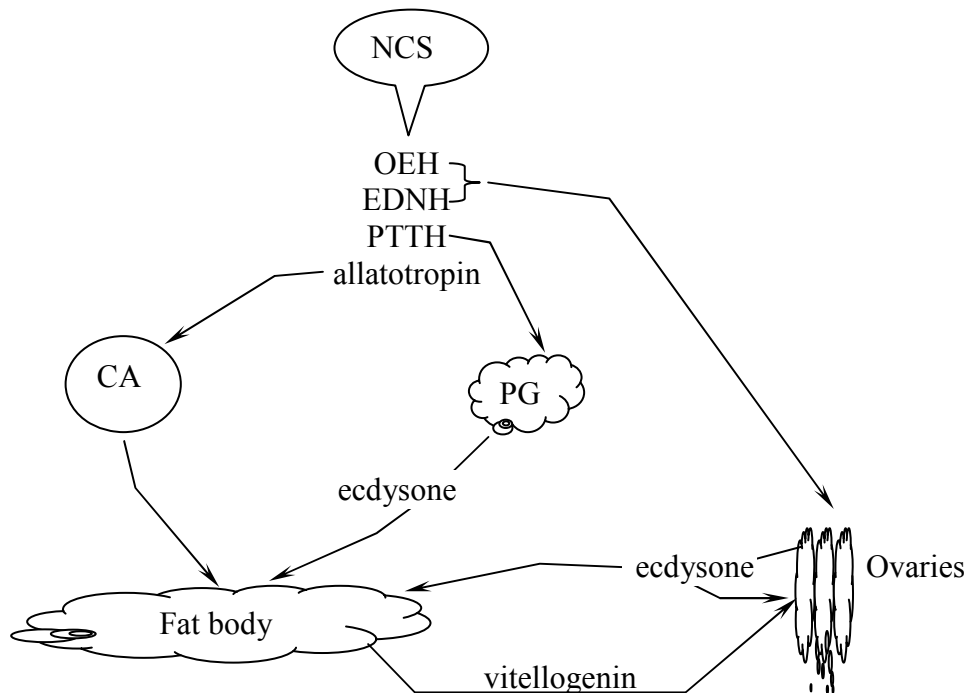
5.11.1. Vitellogenesis and its regulation

In the ovary:



Vitellogenesis involves:

- vitellogenins production by the fat body, influenced by the JH or ecdysone, depending on insect taxa
- vitellogenins are released into the haemolymph
- vitellogenins are then taken up by the oocytes, influenced by ecdysone or JH, depending on insect taxa
- once in the oocyte, vitellogenins are converted into vitellins



6.2. Life-history – pattern and phases

- Ontogeny = developmental history from egg to adult.
- Pattern:
 - *ametaboly* = hatch from egg ==> miniature of adult but lacking genitalia (wingless orders, Thysanura, Archaeognata).
In contrast, all pterygotes undergo metamorphosis:
 - *hemimetaboly* (incomplete metamorphosis) fig. 6.2.
egg ==> 1st ==> 2nd ==> 3rd ==> instar larva ==> nymph ==> adult.
= *exopterygota*: developing wings are visible in external sheaths on the dorsal surface of the nymphs or larvae
 - *holometaboly* (complete metamorphosis) fig. 6.3.
egg ==> 1st ==> 2nd ==> 3rd ==> instar larva ==> pupa ==> adult.
= *endopterygota*: wings disc internal.

6.2.1. Phases in insect ontogeny

- + *embryonic*: eggs (activated by fertilization, sexuality, O₂ and physical distortion in parthenogenetic species) → mitotic division → start of embryogenesis.
- + *Larval/nymphal*:
 - holometabola: | hatch | → 1st instar larva → | moult I | → 2nd instar larva →
 - hemimetabola: | hatch | → 1st instar nymph
- + *Metamorphosis*:
 - holometabola: slight morphological changes e.g. cockroaches.
 - hemimetabola: body is largely reconstructed. Only this group has a metamorphosis involving pupal stadium, during which adult structures are elaborated from larval structures, i.e. wing pad, legs, genitalia, gonads increase in size and complexity.
Cue : body size → signal → brain → hormonal changes.
- + *Imaginal*: eclosion from pupae → maturation → reproductively competent.

6.3. Process and control of moulting

A new instar comes into existence at apolysis when epidermis separates from the cuticle of the previous stage.

Process of moulting involves

- hormonal
- behavioral
- epidermal and cuticular changes leading to ecdysis (shedding of the old cuticle).

Epidermal cells are actively involved in:

- partial breakdown of the old cuticle
- formation of the new cuticle

The sequence of moulting process:

Apolysis: retraction of epidermal cells from the inner surface of the cuticle anterioposteriorly.

Mitotic division of the epidermal cells → increases in volume and surface area.

Apolysial space becomes filled with inactive moulting fluid.

Activation of Chitinolytic and proteolytic enzymes. This occurs when epidermal cells have laid down epicuticle.

Lysis and resorption of the old endocuticle, while the new cuticle continues to be deposited.

Ecdysis: splitting along the dorsal mid line of the old cuticle as a result of increase in haemolymph pressure.

Swallowing of air or water to smooth and stretch the wrinkled procuticle.

Schlerotization: stiffening and darkening of the newly formed cuticle.

The above events are affected by hormones acting on the epidermal cells to control the cuticular changes and also on the nervous system to coordinate behavioral changes associated with moulting process (Fig. 6.9)