

Pembelajaran 10: Evolusi

Sumber: Modul PKB (Pengembangan Keprofesian Berkelanjutan) Biologi SMA

Kelompok Kompetensi D, Bab Evolusi

Penulis: Dr Yeni Hendriani, M. Si

A. Kompetensi

Setelah mempelajari materi ini diharapkan peserta menguasai kompetensi sebagai berikut :

1. Memahami pengertian dan perkembangan teori evolusi.
2. Memahami prinsip-prinsip evolusi
3. Memahami bukti-bukti evolusi

B. Indikator Pencapaian Kompetensi

Setelah melaksanakan pembelajaran, guru dapat menunjukkan beberapa indikator tentang Evolusi berikut ini.

1. Menjelaskan pengertian evolusi.
2. Menjelaskan perkembangan teori evolusi.
3. Menjelaskan prinsip-prinsip evolusi.
4. Menjelaskan bukti-bukti evolusi.

C. Uraian Materi

1. Pengertian Evolusi

Evolusi merupakan kata yang berasal dari bahasa latin yang artinya "membuka gulungan" atau "membuka lapisan". Kemudian bahasa itu diserap menjadi bahasa inggris evolution yang berarti perkembangan secara bertahap. Di dalam biologi, pengertian evolusi telah mengalami perkembangan, menurut Darwinisme: Evolusi adalah perubahan bertahap pada rentang waktu yang sangat panjang (makro evolusi). Dengan berkembangnya genetika molekuler, para ilmuwan mengembangkan teori evolusi komprehensif yang menggabungkan Darwinisme dengan Mendelisme yang selanjutnya dikenal sebagai sintesis

modern (*modern synthesis*). Menurut sintesis modern: evolusi adalah perubahan frekuensi alel dari suatu populasi persatuan waktu (mikro evolusi) (Iskandar, 2008).

Disebut sebagai sintesis, karena teori ini memadukan penemuan-penemuan dan ide dari berbagai bidang yang berbeda, yang meliputi paleontologi, taksonomi, biogeografi, dan genetika populasi. Di antara arsitek sintesis modern terdapat ahli genetika Theodosius Dobzhansky, ahli biogeografi, dan ahli taksonomi Ernst Mayr, ahli paleontologi George Gaylord Simpson, dan ahli Botani G. Ledyard Stebbins. Sintesis modern menekankan arti penting populasi sebagai unit evolusi, peran sentral seleksi alam sebagai mekanisme terpenting dalam evolusi, dan ide tentang gradualisme untuk menjelaskan bagaimana perubahan besar (spesiasi) dapat berkembang sebagai suatu akumulasi perubahan kecil (perubahan frekuensi alel) yang terjadi selama periode waktu yang panjang (Campbell, 2003). Biologi abad ke-20 telah dipengaruhi begitu dalam oleh sintesis modern, yang telah membentuk sebagian besar ide tentang bagaimana populasi berkembang dan berevolusi.

Evolusi pada akhirnya adalah suatu proses penciptaan keanekaragaman makhluk hidup. Seperti halnya dikemukakan Vyrba guru besar Paleontologi dan Biologi Yale University, bahwa bukti terbaik untuk evolusi adalah adanya keanekaragaman organisme hidup, penyebaran karakteristik di antara spesies, dan pola hirarki keanekaragaman. Dari waktu ke waktu, spesies baru berkembang dari spesies yang ada melalui spesiasi, dan spesies lain punah, menghasilkan perubahan yang terus menerus dalam dunia biologi yang dicerminkan dalam rekaman fosil. Sekitar 99% dari semua spesies yang pernah hidup di Bumi ini sudah punah (Campbell, 2003).

Teori evolusi menjelaskan bagaimana terjadinya proses perubahan pada makhluk hidup yang menyimpang dari struktur awal dalam jumlah yang banyak dan beraneka ragam sehingga kemudian menyebabkan terjadinya dua kemungkinan. Pertama, makhluk hidup yang berubah akan mampu bertahan dan tidak punah atau disebut juga dengan istilah *evolusi progresif*. Sedangkan kemungkinan atau opsi yang kedua adalah makhluk hidup yang berubah atau berevolusi tadi gagal bertahan hidup dan akhirnya punah atau disebut dengan

evolusi regresif. Menurut Teilhard de Chardin proses evolusi dibedakan menjadi 3 tahap, seperti berikut ini.

a. Tahap Geosfer

Tahap pra-hidup, tahap perubahan yang terutama menyangkut perubahan tata surya.

b. Tahap Biosfer

Kalau pada tahap geosfer yang menjadi masalah adalah adanya "loncatan" dari materi tak hidup menjadi materi hidup, maka pada tahap biosfer yang dimasalahkan adalah "loncatan" munculnya manusia.

b. Tahap Nesosfer

Pada tahap ini yang penting pada makhluk hidup dalam hal ini manusia adalah terjadi evolusi kesadaran batin yang semakin mantap. Dengan cara menghubungkan keanekaragaman kehidupan dengan mekanisme penyebab alamnya, Darwin memberikan suatu dasar ilmiah yang jelas bagi ilmu biologi. Namun demikian, produk evolusi yang beraneka ragam sungguh sangat elok dan mengilhami banyak pemikiran. Sebagaimana yang dikatakan Darwin dalam alinea penutup bukunya *The Origin of Species*, "Ada keagungan dalam kehidupan dilihat dari sudut pandang ini".

1. Perkembangan Teori Evolusi

Gagasan tentang evolusi biologi sudah ada sejak zaman dahulu, khususnya di antara ahli filsafat Yunani seperti Anaximander dan Epicurus serta ahli filsafat India seperti Patanjali. Namun, teori ilmiah evolusi belum mapan sampai abad ke 18 dan 19. Pemahaman modern tentang evolusi didasarkan pada teori seleksi alam, yang pertama kali diperkenalkan dalam karya ilmiah bersama antara Charles Darwin dan Alfred Russel Wallace pada tahun 1858, dan dipopulerkan di dalam buku Darwin *The Origin of Species* pada tahun 1859. Pada tahun 1930 an, para ilmuwan mengkombinasikan seleksi alam Darwinian dengan teori dari hereditas Mendelian untuk membentuk sintesis evolusi modern, yang juga dikenal sebagai "Neo-Darwinism". Berikut ini dikemukakan beberapa tokoh yang berperan dalam pengembangan teori evolusi.

a. Aristoteles (Teori Statis)

Menurut Aristoteles, semua bentuk kehidupan dapat disusun dalam suatu skala atau tangga dengan tingkat kerumitan yang semakin tinggi, idenya ini dikenal

sebagai “skala alam” atau *scale of nature*. Aristoteles berargumentasi bahwa setiap spesies mempunyai wujud yang unik dan bisa digolongkan dari karakteristik-karakteristik kuncinya. Di dalam prosesnya, Aristoteles mengorganisasikan makhluk hidup dalam suatu hirarki seperti tangga, dengan tumbuhan ditempatkan di bagian bawah, hewan ditempatkan di pertengahan, dan manusia ditempatkan paling atas. Pada masa itu diyakini bahwa spesies itu bersifat permanen (*Fixisme*) di mana organisme-organisme satu spesies adalah identik, sempurna dan tidak berkembang. Kelainan pada suatu organisme adalah dosa atau hukuman, manusia pasrah kepada alam, ilmu pengetahuan belum berkembang, sehingga *kreasionisme* (penciptaan) merupakan satu-satunya jawaban.

Tabel 11 Hubungan waktu geologis dengan keanekaragaman organisme
Sumber: Campbell, 2003.

ZAMAN (ERA)	MASA (PERIOD)	KURUN	UMUR (JUTAAN TAHUN SILAM)	BEBERAPA PERISTIWA PENTING DALAM SEJARAH KEHIDUPAN
SENOZOIKUM	Kuartener	Baru-baru ini	0.01	Waktu sejarah
		Pleistosen	1.8	Zaman es, munculnya manusia
	Tersier	Pliosen	5	Munculnya nenek moyang manusia yang mirip kera
		Miosen	23	Penyebaran hewan dan angiosperma berlanjut terus
		Oligosen	35	Kemunculan banyak kelompok primata, termasuk kera
		Eosen	57	Dominansi angiosperma meningkat, kemunculan sebagian besar ordo mamalia modern
		Paleosen	65	Radiasi utama mamalia, burung dan serangga

ZAMAN (ERA)	MASA (PERIOD)	KURUN	UMUR (JUTAAN TAHUN SILAM)	BEBERAPA PERISTIWA PENTING DALAM SEJARAH KEHIDUPAN
				penyerbuk
MESOZOIKUM (Mesozoic)	Kretaseus (cretaceous)		145	Tumbuhan berbunga (Angiosperma) muncul, banyak kelompok organisma termasuk sebagian besar garis keturunan dinosaurus menjadi punah pada akhir periode ini. (kepunahan pada masa kretaseus).
	Jura (Jurassic)		208	Tumbuhan gimnosperma masih dominan, dinosaurus dominan
	Trias (Triassic)		215`	Tumbuhan gimnosperma mendominasi daratan, radiasi dinosaurus, mamalia awal, dan burung-burung.
PALEOZOIKUM (Paleozoic)	Permium (Permian)		290	Kepunahan banyak organisme laut dan darat. (kepunahan pada masa permium), radiasi reptilia, kemunculan reptilia yang mirip mamalia dan sebagian besar ordo modern.
	Karboniferus (Carboniferous)		300	Hutan yang luas dengan tumbuhan vaskuler, tumbuhan berbiji pertama, kemunculan reptilia, amfibi dominan.

ZAMAN (ERA)	MASA (PERIOD)	KURUN	UMUR (JUTAAN TAHUN SILAM)	BEBERAPA PERISTIWA PENTING DALAM SEJARAH KEHIDUPAN
	Devon (Devonian)		409	Diversifikasi ikan bertulang; amfibia dan serangga pertama.
	Silur (Silurian)		430	Diversifikasi ikan tak berahang; ikan berahang pertama, kolonisasi daratan oleh tumbuhan vaskuler dan artropoda.
	Ordovisium (Ordovician)		510	Kemunculan tumbuhan; alga laut berlimpah.
	Kambrium (Cambrian)		570	Asal mula sebagian besar filum hewan modern (Ledakan pada masa kambrium).
PRAKAMBRIUM (Precambrian)			610	Beranekaragam hewan invertebrata berbadan lunak; vertebrata pertama; beranekaragam alga.
			700	Fosil hewan tertua
			1700	Fosil eukariota tertua
			2500	Oksigen mulai menumpuk di atmosfer
			3500	Fosil tertua yang diketahui (prokariota)
			4600	Perkiraan waktu permulaan bumi

b. Carolus Linnaeus (Penggagas Taksonomi)

Carolus Linnaeus (1707-1798) adalah pemikir pertama yang lebih jauh lagi mencoba untuk menggolongkan makhluk hidup. Beliau mengembangkan sistem dua bagian atau Binomial untuk menamai organisme menurut genus dan spesies. Linnaeus mengelompokkan spesies berdasarkan tingkat kemiripan. Spesies yang mirip satu sama lain dikelompokkan ke dalam genus yang sama, genus yang mirip dikelompokkan pada famili yang sama dan seterusnya. Bagi Linnaeus, pengelompokkan spesies yang mirip dalam satu kelompok tidak mengimplikasikan adanya pertalian keluarga menurut garis evolusi, tetapi seabad kemudian sistem taksonominya ternyata menjadi titik fokus pendapat Darwin tentang evolusi. Sistem klasifikasi biologi modern, menunjukkan bahwa seluruh dunia kehidupan dapat diatur dalam hierarki yang apabila digambarkan dalam bentuk diagram, menyerupai silsilah. Setelah Linnaeus, para naturalis sering menanggapi bahwa makhluk hidup saling 'berkerabat' namun mereka belum tahu apa penyebabnya.

c. James Hutton (Teori Gradualisme)

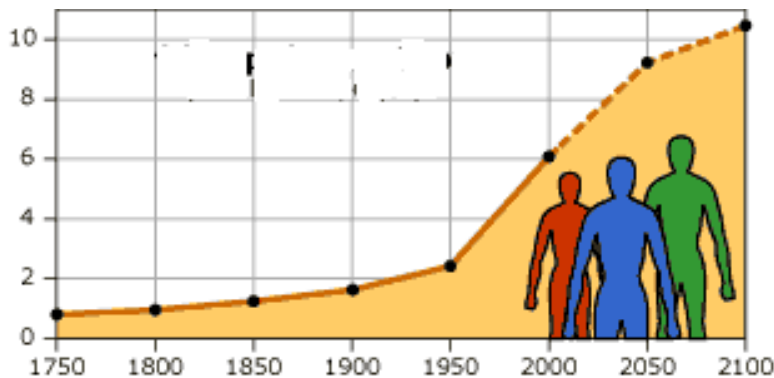
Pada tahun 1795 James Hutton ahli geologi Skotlandia menjelaskan sifat dan ciri geologis Bumi dengan teori gradualisme (secara bertahap), yang menganggap bahwa perubahan mendalam dan nyata dari ciri dan sifat geologis Bumi merupakan produk kumulatif proses yang berlangsung lambat namun berlangsung terus menerus. Misalnya tebing terbentuk oleh sungai yang memotong bebatuan.

c. Thomas Malthus (Pertumbuhan Populasi versus Persediaan Makanan)

Thomas Malthus (1766-1834) mempunyai tempat khusus dalam sejarah biologi, meskipun dia bukan ahli biologi tetapi seorang ahli ekonomi politik. Malthus menjadi terkenal pada tahun 1798 ketika dia menerbitkan sebuah essay yang berjudul "The Principle of Population as it affects the Future Improvement of Society". Di dalamnya, Malthus mengangkat keraguan-keraguan tentang apakah suatu bangsa bisa menjangkau suatu titik di mana hukum tidak lagi diperlukan, dan setiap orang hidup dengan makmur dan harmonis. Menurut Malthus diperlukan perjuangan yang keras untuk mempertahankan eksistensi manusia, karena potensi pertumbuhan populasi manusia seperti deret geometri (kelipatan

2) sedangkan kemampuan untuk menyediakan makanan dan sumber daya lainnya seperti deret aritmetik (deret hitung), lihat gambar 3.1.

Sebagai akibatnya, cepat atau lambat akan terjadi perbenturan antar anggota populasi dalam pemanfaatan sumber daya khususnya bila ketersediaannya terbatas. Hanya sebagian, seringkali merupakan bagian kecil, dari keturunannya yang akan bertahan hidup: sementara sebagian lainnya akan tereliminasi. Satu-satunya alasan bahwa umat manusia tidak ada dalam kondisi kelaparan yang terus menerus karena pertumbuhannya secara terus menerus dibatasi dengan kekuatan seperti wabah penyakit, peperangan, atau penundaan pernikahan sampai usia dewasa. Malthus menunjukkan bahwa kekuatan yang sama dari fertilitas dan kelaparan yang membentuk umat manusia juga bekerja pada hewan dan tumbuhan. Darwin mengadaptasikan gagasan Malthus kepada teori evolusinya, bahwa untuk mempertahankan dirinya, manusia harus berkembang untuk menyesuaikan diri seperti umumnya hewan yang lain.



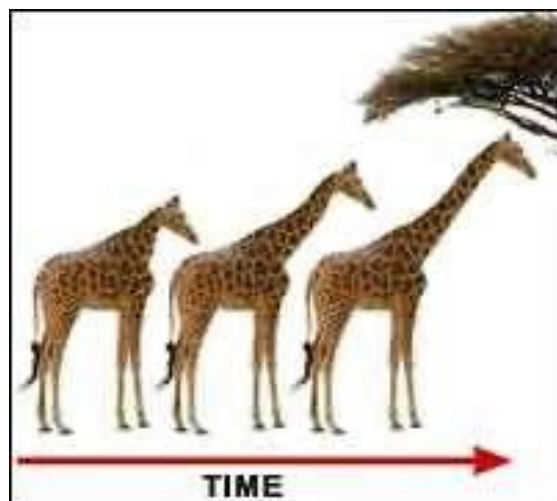
Gambar 118. Pertumbuhan Populasi Manusia (dalam hitungan miliar orang)
Sumber : <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>

Gambar 103 diatas menunjukkan bahwa antara tahun 1800 dan 2000 populasi manusia meningkat enam kali lipat. Adakah langkah-langkah untuk menjaga ketersediaan makanan? Akankah di sana ada makanan yang cukup untuk mendukung populasi manusia yang diproyeksikan menjadi 92 milyar di tahun 2050?

d. Jean Baptiste de Lamarck (Teori Dinamis)

Ilmuwan pertama yang mengajukan suatu model komprehensif tentang terjadinya perubahan terhadap makhluk hidup seiring dengan waktu sebagai akibat dari pengaruh lingkungan adalah seorang naturalis dari Perancis yang bernama Jean B. Lamarck. Dia bekerja dalam klasifikasi cacing, laba-laba, moluska (hewan bertubuh lunak seperti keong), dan makhluk-makhluk tanpa tulang belakang lainnya. Lamarck melihat adanya kesamaan-kesamaan dari hewan-hewan yang dia pelajari, dan sangat terkesan oleh perkembangan rekaman fosil. Hal itu mendorong dia untuk berpikir bahwa kehidupan itu tidak tetap. Ketika lingkungan berubah, organisme harus mengubah perilaku mereka (adaptasi) untuk bertahan hidup.

Ide pokok Lamarck adalah bahwa bagian-bagian tubuh yang lebih banyak digunakan untuk menghadapi lingkungan akan menjadi lebih besar dan kuat, sedangkan bagian-bagian tubuh yang tidak digunakan (*disuse*) akan mengalami penurunan. Modifikasi yang didapatkan oleh suatu organisme selama masa hidupnya dapat diturunkan kepada keturunannya. Jadi, penekanan teori Lamarck adalah bahwa adaptasi terhadap lingkungan merupakan produk utama evolusi, perhatikan Gambar 104.



Gambar 119. Lamarck percaya bahwa leher jerapah yang panjang berkembang dari generasi-generasi jerapah yang memanjangkan lehernya untuk mencapai daun-daun yang lebih tinggi

(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

Charles Lyell (Teori Uniformitarianisme/Keseragaman)

Teori Hutton tentang gradualisme selanjutnya dipadukan oleh Charles Lyell (1797-1875) dalam suatu teori yang dikenal dengan nama Uniformitarianisme. Teori ini menyatakan bahwa proses geologis masih belum berubah sepanjang sejarah Bumi ini. Dengan demikian, gaya yang bekerja saat ini dalam membentuk ciri geologis Bumi sama besarnya dengan gaya di masa silam (Gambar 105). Teori gradualisme dan uniformitarianisme ini juga menjadi dasar pemikiran evolusi Darwin. Pertama, jika perubahan geologis merupakan akibat dari kerja yang lambat namun terus menerus dan bukan akibat dari kejadian yang tiba-tiba maka bumi pasti sudah sangat tua. Kedua, proses yang sangat lambat namun sangat halus yang bertahan selama periode yang sangat panjang dapat menyebabkan perubahan yang cukup besar.

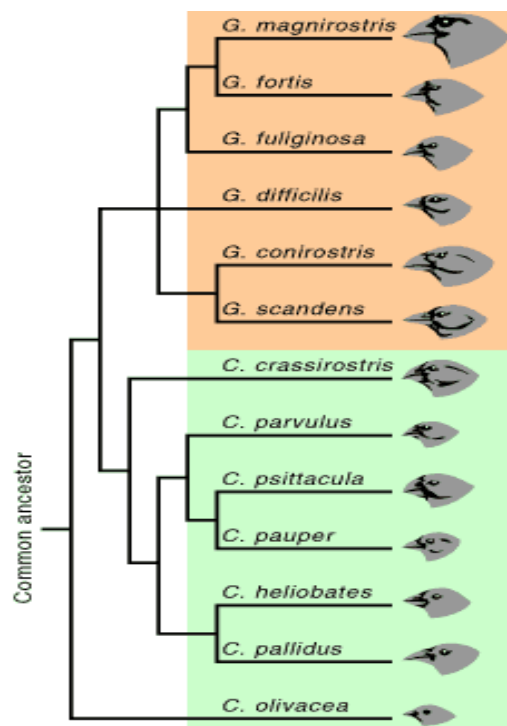


Gambar 120. Lyell menemukan bukti bahwa lembah-lembah dibentuk melalui proses yang lambat dari erosi, bukan oleh karena malapetaka banjir.
(sumber <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

e. Charles Darwin (Teori Evolusi, Seleksi Alam)

Darwin adalah seorang naturalis Inggris yang mengikuti eksplorasi kapal HMS Beagle untuk membuat peta pelabuhan dunia pada tahun 1831. Di sepanjang perjalanan inilah (selama lima tahun, yaitu dari 27 Desember 1831 hingga 2 Oktober 1836) dia meneliti berbagai jenis hewan dan tumbuhan yang

dijumpainya. Darwin menggambar dan menulis tentang apa yang dia lihat, mengirim banyak spesimen ke Inggris, dan mengembangkan gagasan tentang hidup, kehidupan di masa lampau dan bagaimana caranya berubah menjadi seperti sekarang. Darwin berada di Kepulauan Galapagos selama kurang lebih 2 bulan dan melakukan berbagai pengamatan terhadap berbagai jenis hewan yang ada di kepulauan terpencil itu (Gambar 106). Melalui pengamatan ini, dan juga berbagai pengamatan lanjutan yang dilakukannya selama puluhan tahun atas koleksi hewan dan tumbuhan yang diperolehnya, Darwin membentuk embrio teori evolusi. Pada tahun 1859, Darwin menerbitkan buku "*On the Origin of Species by means of Natural Selection*", yang menyajikan bukti-bukti yang menunjukkan bahwa kehidupan telah berevolusi sepanjang sejarahnya dan bahwa mekanisme yang menyebabkan terjadinya evolusi adalah seleksi alam.



Gambar 121. Di pulau Galapagos Darwin menemukan 13 spesies burung Finch (*Geospiza* sp) yang beradaptasi dengan relung lingkungan yang berbeda. Burung-burung tersebut berbeda dalam bentuk paruh, sumber makanan, dan cara memperoleh makanan.

Sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>

Ahli Biologi evolusi Ernst Mayr menguraikan logika teori seleksi alam Darwin menjadi tiga inferensi (kesimpulan) berdasarkan lima pengamatan (Campbell, 2003), yaitu sebagai berikut:

Observasi 1: Semua spesies memiliki potensi fertilitas yang sedemikian besar sehingga jumlah populasinya akan meningkat secara eksponensial jika semua individu yang dilahirkan berhasil bereproduksi dengan baik.

Observasi 2: Populasi cenderung menjadi stabil dalam jumlah, kecuali ada fluktuasi musiman.

Observasi 3: Sumber daya lingkungan adalah terbatas.

Kesimpulan 1: Pertambahan individu yang lebih banyak dibandingkan dengan yang dapat didukung oleh lingkungan akan mengakibatkan adanya persaingan untuk mempertahankan keberadaan individu di dalam populasi itu, sehingga hanya sebagian keturunan yang dapat hidup pada setiap generasi.

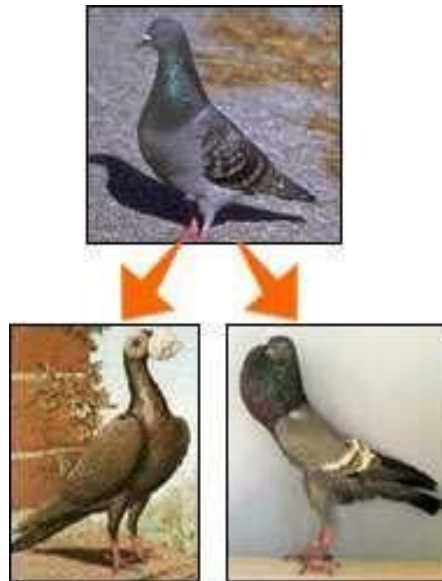
Observasi 4: Individu-individu dalam suatu populasi sangat jauh berbeda dalam hal ciri-ciri khasnya; tidak akan ada dua individu yang persis sama.

Observasi 5: Banyak di antara variasi tersebut dapat diturunkan.

Kesimpulan 2: Kelangsungan hidup dalam perjuangan untuk mempertahankan hidup tidak terjadi secara acak, tetapi bergantung sebagian pada susunan sifat yang diwarisi dari individu-individu yang bertahan hidup. Individu yang mewarisi sifat baik yang membuat individu tersebut cocok dengan lingkungannya besar kemungkinan akan menghasilkan lebih banyak keturunan dibandingkan dengan individu yang kurang cocok sifatnya terhadap lingkungan.

Kesimpulan 3: Kemampuan individu yang tidak sama untuk bertahan hidup dan bereproduksi ini akan mengakibatkan suatu perubahan secara bertahap dalam suatu populasi dan sifat-sifat menguntungkan akan berakumulasi sepanjang generasi.

Di samping itu Darwin juga menemukan bukti terjadinya seleksi alam pada seleksi tiruan (*artificial selection*) seperti ditunjukkan pada gambar 122.



Gambar 122. Merpati pos (bawah kiri) dan Brunner pouter (bawah kanan) berasal dari merpati batu karang yang liar (atas)
(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

f. Alfred Russel Wallace (Teori Evolusi: Seleksi Alam)

Wallace adalah seorang naturalis Inggris yang hidup semasa dengan Darwin. Wallace secara terpisah juga mengembangkan teori seleksi alam yang pada dasarnya sama dengan yang dikemukakan oleh Darwin. Darwin dan Wallace cukup lama berkorespondensi secara ilmiah. Wallace malah banyak mengirim spesies-spesies penemuan barunya dari Asia ke Darwin untuk diteliti. Menurut Wallace, teorinya tentang evolusi hasil pemikiran yang datang secara spontan. Di lain pihak, teori evolusi Darwin adalah hasil pemikiran secara metodis selama bertahun-tahun. Ironisnya, Darwin menjadi jauh lebih terkenal daripada Wallace sendiri. Namun demikian, Wallace adalah salah satu pembela Darwin dan teorinya dimasa kontroversial setelah buku "*The Origin of Species*" diterbitkan. Walaupun ide evolusi (bahwa makhluk hidup secara berangsur-angsur berubah) telah didiskusikan jauh sebelum abad ke-19, Darwin dan Wallace adalah orang yang pertama mencetuskan bagaimana proses evolusi itu berlangsung.

g. Gregor Johann Mendel (Teori Genetika)

Mendel adalah seorang pendeta dan ilmuwan dari Austria yang mempelajari ilmu keturunan. Dengan mengobservasi kacang polong (*Pisum sativum*) selama bertahun-tahun, Mendel mengambil kesimpulan bahwa ada suatu pola dalam pewarisan sifat keturunan. Hasil penyelidikan Mendel menjadi dasar ilmu genetika. Walaupun sebagian besar ilmuwan Biologi dapat diyakinkan Darwin bahwa spesies merupakan hasil evolusi, namun ada permasalahan mengenai ide seleksi alam sebagai mekanisme evolusi.

Ada kekurangan dalam penjelasan Darwin, yaitu pemahaman pewarisan yang dapat menjelaskan bagaimana variasi acak muncul dalam suatu populasi. Padahal Gregor Mendel dan Charles Darwin hidup pada masa yang sama, namun tidak ada yang dapat melihat dan menyadari bahwa Mendel telah menemukan prinsip dasar pewarisan yang sudah pasti dapat menyelesaikan permasalahan Darwin dan memberikan kredibilitas terhadap seleksi alam.

h. Evolusi Modern (Neo-Darwinisme)

Sintesis evolusi modern mengacu pada satu set gagasan dari beberapa spesialis biologi yang bersama-sama membentuk suatu teori evolusi komprehensif yang diterima oleh mayoritas ahli biologi. Sintesis ini dibentuk sekitar tahun 1936-1947 dengan mengembangkan genetika populasi yang merupakan integrasi antara seleksi alam Darwin dengan genetika Mendel. Huxley Julian menemukan istilah ini pada tahun 1942, ketika ia meringkas gagasan-gagasan di dalam bukunya, *Evolution: Modern Synthesis*. Meskipun sekarang Sintesis Modern merupakan dasar pemikiran evolusi, teori ini mengacu kepada suatu peristiwa historis yang terjadi sekitar tahun 1930 dan 1940. Tokoh utama yang mengembangkan sintesis modern di antaranya R.A. Fisher, Theodosius Dobzhansky, J.B.S. Haldane, Sewall Wright, Julian Huxley, Ernst Mayr, Bernhard Rensch, Sergei Chetverikov, George Gaylord Simpson, dan G. Ledyard Stebbins. Sintesis evolusi modern dikenal juga sebagai sintesis baru, sintesis modern, sintesis evolusi, atau *neo-Darwinisme*.

Pada tahun 1940, berdasarkan eksperimen Griffith Avery, McCleod dan McCarty secara pasti mengenali DNA (*deoxyribonucleic acid*) sebagai agen yang bertanggung jawab untuk meneruskan informasi genetika. Sejak tahun 1940,

suatu teori evolusi baru muncul yang menyebutkan bahwa perubahan evolusioner terjadi secara cepat antara periode panjang dari stabilitas spesies. Teori ini dikenal sebagai "*punctuated evolution*" yang merupakan teori evolusi yang paling akhir dan dikemukakan oleh Stephen Jay Gould dan Niles Eldredge. Penemuan mereka tentang bagaimana hereditas bekerja via DNA merupakan penjelasan yang lebih tepat tentang mekanisme evolusi.

Walter S. Sutton, Theodor Boveri, Wilhelm Johannsen, Thomas Hunt Morgan, and Hermann Muller telah menyelidiki hubungan yang kompleks antara kromosom, gen, dan hukum-hukum hereditas. Ahli Biometrik seperti Ronald Fisher, John Haldane, dan Reginald Crundall Punnett telah menggunakan matematika dan teknik statistika untuk menganalisis perubahan genetik dengan demikian menetapkan bidang genetika populasi. Julian Huxley, cucu dari T. H. Huxley, memberikan kontribusi penting untuk bidang embriologi, antar bidang-bidang yang lain. Paleontologis George Simpson memfokuskan penelitiannya pada pola migrasi antar benua dari spesies masa lampau. James Watson dan Francis Crick memperkenalkan model DNA untuk menjelaskan dasar kimia dari gen, hereditas, dan evolusi.

Sintesis modern menguraikan evolusi sebagai suatu perubahan di dalam frekuensi alel dalam suatu populasi dari satu generasi ke generasi berikutnya. Teori ini sekarang menjadi pusat prinsip pengaturan dari biologi modern, yang berhubungan secara langsung dengan topik-topik seperti asal-usul resistensi antibiotika pada bakteri, sosialitas pada serangga, dan keanekaragaman hayati dari kehidupan di Bumi. Pengembangan terbaru yang paling penting dalam biologi evolusi adalah meningkatnya pemahaman dan kemajuan genetika.

Jika menurut Darwin mekanisme evolusi itu terjadi karena seleksi alam, maka menurut Sintesis Modern, evolusi terjadi tidak hanya karena seleksi alam tetapi juga disebabkan oleh hanjutan/pergeseran genetik (*genetic drift*), aliran gen (*gene flow*), mutasi, dan perkawinan tidak acak.

2. Prinsip-Prinsip Evolusi

Berikut ini adalah prinsip-prinsip yang bekerja ketika proses evolusi terjadi.

- a. Pada satu waktu evolusi terjadi lebih cepat dari yang lainnya. Bentuk baru muncul dan bentuk lama punah.
- b. Laju kecepatan evolusi tidak sama pada organisme yang berbeda.
- c. Spesies baru bukan merupakan bentuk yang paling sempurna tapi bentuk yang sudah terspesialisasi.
- d. Evolusi tidak selalu dari yang sederhana ke kompleks.
- e. Evolusi terjadi dalam populasi bukan dalam individu.

3. Mekanisme Evolusi

Titik balik yang menentukan perkembangan dalam teori evolusi adalah kelahiran cabang ilmu biologi baru, yaitu Genetika Populasi. Ilmu ini menunjukkan tentang luasnya variasi genetik di dalam populasi dan mengenali arti penting dari perubahan sifat-sifat yang terakumulasi dari generasi ke generasi. Untuk memahami hubungan genetika populasi dengan evolusi, mari kita mulai dengan konsep spesies. Spesies adalah sekelompok individu sejenis yang mempunyai potensi untuk saling mengawini dan menghasilkan keturunan yang fertil di alam bebas. Sekelompok spesies yang hidup pada tempat dan waktu yang sama disebut populasi. Evolusi terjadi ketika ada perubahan di dalam struktur genetika dari suatu populasi. Untuk memahami bagaimana suatu populasi berubah, para ahli biologi mempelajari jenis dan jumlah gen dari suatu populasi. Kumpulan gen (*gene pool*) adalah seluruh alela dari seluruh gen yang terdapat dalam seluruh individu dari suatu populasi pada suatu periode tertentu. Proporsi relatif alela dalam suatu populasi dinyatakan dengan frekuensi alela. Struktur genetik suatu populasi ditentukan oleh frekuensi alel dan genotipnya.

Menurut teorema Hardy-Weinberg "*frekuensi alel dan genotip dalam kumpulan gen suatu populasi tetap konstan selama beberapa generasi kecuali kalau ada yang bertindak sebagai agen lain selain rekombinasi seksual*". Teorema Hardy-Weinberg menjelaskan suatu kumpulan gen yang berada dalam suatu kesetimbangan, yaitu suatu populasi yang tidak berevolusi. Nilai kesetimbangan dari frekuensi alel dan genotip yang dihitung berdasarkan persamaan Hardy-Weinberg memberikan dasar untuk melacak struktur genetik suatu populasi selama beberapa generasi. Jika frekuensi alel atau genotipnya menyimpang dari

nilai yang diharapkan dari kesetimbangan Hardy-Weinberg, maka populasi tersebut dinyatakan sedang berevolusi. Dengan demikian, definisi evolusi pada tingkat populasi dapat dinyatakan sebagai "perubahan frekuensi alel atau genotip populasi dari generasi ke generasi" atau "perubahan dalam struktur genetik populasi". Karena perubahan dalam suatu kumpulan gen itu adalah evolusi dalam skala terkecil, maka keadaan ini secara khusus disebut sebagai *mikroevolusi*.

Kesetimbangan Hardy-Weinberg hanya dapat dipertahankan jika:

- a. Ukuran populasi sangat besar. Dalam populasi yang besar, hanjutan/pergeseran genetik (*genetic drift*) yang merupakan fluktuasi acak dalam kumpulan gen tidak akan mengubah frekuensi alel.
- b. Terisolasi dari populasi lain. Pada populasi yang terisolasi tidak akan ada aliran gen (perpindahan alel antar populasi akibat perpindahan individu atau gamet) yang dapat mengubah kumpulan gen.
- c. Tidak ada mutasi. Perubahan satu alel menjadi alel lain akibat mutasi akan mengubah frekuensi alel dan genotip suatu populasi.
- d. Perkawinan acak. Dengan perkawinan acak frekwensi alel dan genotip akan mengikuti hukum pewarisan sifat Mendel, sehingga frekwensi alel dan genotip dapat dipertahankan tetap.
- e. Tidak ada seleksi alam. Jika potensi kelangsungan hidup dan keberhasilan reproduksi pada semua individu sama, maka frekwensi alel dan genotip akan tetap dari generasi ke generasi.

Kelima syarat yang diperlukan untuk mempertahankan kesetimbangan Hardy-Weinberg memberikan suatu framework untuk memahami mekanisme evolusi. Seperti telah dikemukakan di atas evolusi akan terjadi jika salah satu syarat tidak terpenuhi. Dengan demikian mekanisme dasar yang menyebabkan proses evolusi adalah seleksi alam, hanjutan/pergeseran genetik (*genetic drift*), aliran gen (*gene flow*), mutasi, dan perkawinan tidak acak. Berikut ini akan dikemukakan penjelasan mekanisme evolusi oleh masing-masing agen penyebab evolusi.

a. Seleksi Alam

Jika kita lihat populasi-populasi makhluk hidup di alam, maka kita akan menemukan bahwa setiap populasi terdiri atas individu-individu yang bervariasi. Beberapa varian mungkin menghasilkan lebih banyak keturunan dibanding yang lain. Keberhasilan yang berbeda dalam reproduksi ini adalah seleksi alam. Tentunya hal ini dipengaruhi oleh kemampuan individu yang tidak sama untuk bertahan hidup dan berproduksi. Menurut *The American Heritage Science Dictionary*, seleksi alam adalah suatu proses di mana organisme-organisme yang lebih baik penyesuaiannya terhadap lingkungan akan menghasilkan keturunan yang lebih banyak dibanding yang lain. Sebagai hasil dari seleksi alam, proporsi organisme suatu spesies dengan karakteristik yang bersifat adaptif terhadap lingkungan akan meningkat pada masing-masing generasi. Oleh karena itu, seleksi alam secara acak memodifikasi variasi asal dari ciri-ciri genetik suatu spesies sehingga alel-alel yang bersifat menguntungkan karena survive akan mendominasi, sedangkan alel-alel yang tidak menguntungkan akan berkurang. Menurut *Merriam-Webster's Medical Dictionary*, seleksi alam adalah suatu proses alami yang akan menghasilkan individu yang *survive* atau kelompok terbaik yang sesuai dengan kondisi di mana mereka hidup dan ini sama pentingnya untuk mengabadikan kualitas genetik yang diinginkan dan untuk menghapus gen yang tidak diinginkan sebagai hasil dari rekombinasi atau mutasi gen.

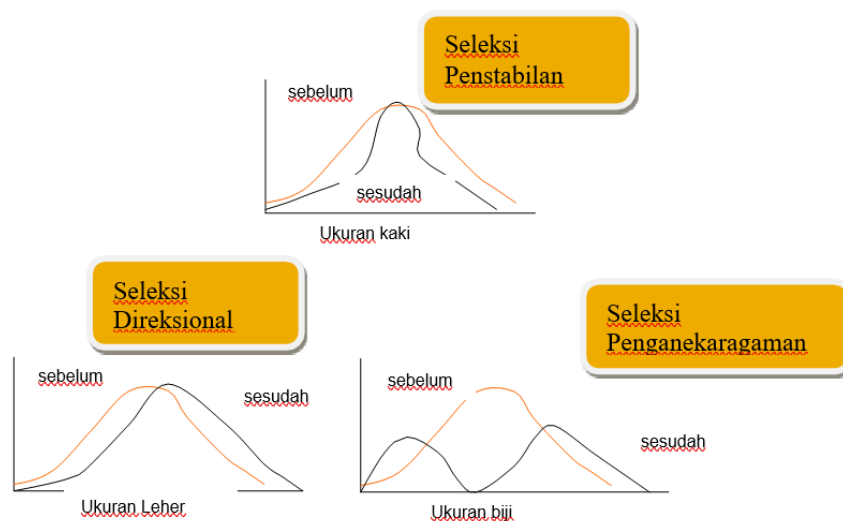
Seleksi alam mengakibatkan alel diturunkan ke generasi berikutnya dalam jumlah yang tidak proporsional dengan frekuensi relatif generasi saat itu, sehingga mengubah kumpulan gen. Seleksi alam mengakumulasi dan mempertahankan genotip yang menguntungkan dalam suatu populasi. Pengaruh seleksi alam dalam penurunan frekuensi suatu sifat dalam suatu populasi berlangsung dengan tiga cara sebagai berikut:

- 1) Seleksi penstabilan (*stabilizing selection*), bekerja terhadap fenotip ekstrim dan menyukai varian antara yang lebih umum. Seleksi ini mengurangi variasi dan mempertahankan keadaan yang tetap pada suatu waktu tertentu untuk suatu fenotip khusus (Gambar 108). Sebagai contoh bayangkan populasi kelinci yang panjang kakinya bervariasi. Pada lingkungan yang di dalamnya terdapat anjing hutan, kelinci yang kakinya panjang akan tereliminasi karena mereka tidak dapat

melintasi lubang-lubang kecil untuk melarikan diri dari anjing hutan. Kelinci yang kakinya pendek juga akan tereliminasi, karena mereka tidak dapat berlari cepat untuk menghindarkan diri dari anjing hutan. Hasilnya adalah populasi kelinci yang panjang kakinya sedang relatif lebih bertahan. Variasi kelinci akan berkurang dan populasi akan stabil.

2) Seleksi langsung (*directional selection*), seleksi ini menggeser keseluruhan susunan populasi dengan cara lebih menyukai salah satu varian yang ekstrim (lihat Gambar 108). Sebagai contoh jika di sebuah hutan terdapat populasi jerapah. Misalkan makanan jerapah adalah daun-daun sejenis pohon yang ukurannya cukup tinggi. Proses seleksi tentu saja ke arah leher yang lebih panjang.

3) Seleksi penganekaragaman (*diversifying selection*), menyeleksi sifat rata-rata dan lebih menyukai sifat yang ekstrim. Perhatikan ukuran biji populasi pohon oak, yang berkisar dari yang kecil hingga yang besar. Umpamakan suatu spesies tupai pemakan biji oak menyerbu hutan. Tupai-tupai itu tidak akan memakan biji yang kecil, sebab terlalu sulit untuk di tempatkan. Mereka juga tidak akan memakan biji yang besar sebab terlalu besar untuk dibawa. Setelah beberapa tahun, biji oak yang ukurannya sedang akan menghilang, tetapi biji yang ukurannya kecil dan besar akan survive dan berkecambah. Selanjutnya hutan oak tersebut akan memiliki pohon dengan dua ukuran biji yang berbeda.



Gambar 123. Cara seleksi alam dalam mempengaruhi penurunan frekuensi suatu sifat (Sumber: Campbell, 2003)

b. Hanjutan/pergeseran genetik (*genetic drift*)

Hanjutan/pergeseran genetik adalah perubahan dalam frekuensi gen pada suatu populasi berukuran kecil akibat kejadian acak. Secara ideal suatu populasi harus berukuran besar agar hanjutan/pergeseran genetik tidak mempengaruhi kumpulan gennya. Pada umumnya hanjutan/pergeseran genetik disebabkan oleh bencana besar dan pembentukan koloni baru oleh sejumlah kecil individu. Bencana besar misalnya letusan gunung berapi dan tsunami dapat mengurangi ukuran populasi secara drastis. Akibatnya, struktur genetik populasi kecil yang selamat mungkin tidak mewakili struktur populasi semula, situasi ini biasanya disebut sebagai efek leher botol (*bottleneck effect*). Dengan hilangnya sebagian besar alel dari kumpulan gen, maka efek leher botol dan hanjutan/pergeseran genetik yang diakibatkannya, akan mengurangi keanekaragaman genetik dalam suatu populasi. Efek leher botol dapat menjelaskan mengapa populasi cheetah memperlihatkan variasi genetik yang sangat sedikit.

Hanjutan/pergeseran genetik juga dapat terjadi ketika pembentukan koloni baru oleh beberapa individu yang menempati suatu habitat yang terisolasi. Semakin kecil ukuran populasi koloni baru, maka semakin kecil kemungkinan susunan genetiknya akan mewakili kumpulan gen populasi asalnya. Hanjutan/pergeseran genetik dalam suatu koloni baru dikenal sebagai efek pendiri (*founder effect*).

c. Aliran gen (*gene flow*)

Aliran gen (juga disebut campuran gen atau migrasi gen) adalah pertukaran dari variasi genetik antar populasi, ketika faktor geografi dan habitat bukan rintangan. Ernst Mayr berpendapat bahwa aliran gen seperti homogenizing (penyamaan gen), dapat menetralkan adaptasi selektif. Pendapat ini didukung oleh Campbell (2003) yang menyatakan bahwa aliran gen cenderung mengurangi perbedaan antara populasi yang telah terakumulasi akibat seleksi alam atau hanjutan/pergeseran genetik. Jika hal ini terjadi cukup luas, aliran gen akhirnya dapat menyatukan populasi yang berdekatan menjadi sebuah populasi tunggal dengan struktur genetik yang sama. Dengan demikian, aliran gen dapat menyebabkan perubahan pada frekuensi alel suatu populasi, kita tahu jika frekuensi alel suatu populasi berubah maka disana telah terjadi proses *mikroevolusi*.

Ketika ada rintangan ke aliran gen, situasi ini dimasukkan ke dalam istilah isolasi reproduksi dan merupakan hal yang penting untuk terjadinya spesiasi. Gerak bebas alel melalui suatu populasi mungkin juga dirintangi oleh struktur populasi. Sebagai contoh, kebanyakan populasi di dunia nyata tidaklah benar-benar secara penuh dapat saling berbiak silang. Jarak geografi mempunyai pengaruh yang kuat terhadap pergerakan alel di dalam populasi.

d. Mutasi

Mutasi adalah perubahan dalam DNA suatu organisme. Suatu mutasi baru yang diturunkan melalui gamet dapat dengan segera mengubah kumpulan gen suatu populasi. Mutasi selalu terjadi. Hampir semua gen mungkin mengalami mutasi sekali pada saat pembelahan yang ke 50.000 hingga 100.000 (Sastrodihardjo, 1980). Kecepatan mutasi dari berbagai gen bervariasi. Alel yang lebih stabil, frekuensinya akan cenderung bertambah banyak, sedangkan alel yang mudah bermutasi akan cenderung untuk berkurang frekuensinya. Meskipun mutasi pada suatu lokus gen tertentu jarang terjadi, dampak kumulatif mutasi tersebut pada semua lokus bisa signifikan. Hal ini disebabkan oleh setiap individu memiliki ribuan gen, dan banyak populasi memiliki ribuan atau jutaan individu. Dengan begitu, dalam jangka panjang mutasi sangat penting bagi evolusi karena mutasi mempertinggi variabilitas yang berfungsi sebagai bahan mentah untuk seleksi alam.

e. Perkawinan Tidak Acak

Syarat lain agar kesetimbangan Hardy-Weinberg dapat dipertahankan adalah perkawinan acak. Tetapi pada kenyataannya, individu lebih sering kawin dengan anggota populasi yang lebih dekat dibandingkan dengan yang lebih jauh jaraknya, terutama pada spesies yang penyebarannya dekat. Hal ini akan mendorong perkawinan antarkerabat (*inbreeding*). Perkawinan tidak acak lainnya adalah *perkawinan assortatif* atau perkawinan berdasarkan pilihan, di mana individu memilih pasangan yang sama dengan dirinya dalam fenotip tertentu. Sebagai contoh, beberapa kodok (*Bufo sp.*) paling sering mengawini kodok yang ukurannya sama.

Perkawinan yang tidak acak akan meningkatkan jumlah genotif homozygot dari lokus gen pada individu. Setiap perubahan dalam perilaku kawin assortatif atau

kawin antar kerabat populasi akan menggeser frekuensi genotif yang berlainan. Dengan demikian, perkawinan tidak acak dapat menyebabkan populasi berevolusi.

5. Bukti-Bukti Evolusi

Selama dan sejak jaman Darwin, orang-orang telah mencari dan mempelajari bukti-bukti evolusi di alam yang mengajari mereka lebih banyak tentang evolusi. Beberapa jenis bukti evolusi, misalnya fosil dan kesamaan antar organisme, telah digunakan oleh Darwin untuk membangun teorinya tentang seleksi alam dan masih digunakan sampai sekarang. Bukti yang lainnya, misalnya uji DNA belum tersedia pada jaman Darwin, tetapi digunakan oleh ilmuwan sekarang untuk mempelajari lebih banyak tentang evolusi.

Lima jenis bukti evolusi dibahas di dalam modul ini, yaitu sisa organisme masa lampau, distribusi geografis spesies (biogeografi), anatomi perbandingan, embriologi perbandingan, dan genetika molekuler. Bukti penting lain yang dipelajari Darwin dan juga masih dipelajari sekarang adalah seleksi buatan, atau domestikasi.

i. Sisa Organisme Masa Lampau

Fosil, bersama-sama dengan anatomi perbandingan dari hewan dan tumbuhan yang ada sekarang, merupakan catatan morfologi atau anatomi dari suatu spesies. Selanjutnya, dengan membandingkan anatomi kedua-duanya yaitu spesies yang hidup di masa lampau dengan spesies yang ada sekarang, paleontologis (ahli fosil) dapat menyimpulkan atau menduga garis keturunan dari spesies tersebut. Bukti Fosil sangat penting, termasuk hubungan dengan kelompok organisme yang disebut *spesies transisi*, seperti *Archaeopteryx sp*, yang menyajikan bukti awal untuk mata rantai antara dinosaurus dan burung serta penemuan terakhir *Tiktaalik sp.* yang menjelaskan pengembangan dari ikan ke hewan berkaki empat.

Darwin dan para ilmuwan sekarang sudah menemukan bahwa sisa organisme-organisme masa lampau yang mereka temukan kelihatan seperti organisme-organisme sekarang. Hal ini dimungkinkan karena mereka adalah nenek moyang (*ancestor*) organisme yang hidup atau berkembang dari seorang nenek moyang umum (*common ancestor*). Sebagai contoh, megatherium mungkin nenek

moyang dari pohon yang ada sekarang. Dewasa ini, fosil-fosil masih menjadi bahan yang dipelajari untuk menemukan lebih banyak bukti tentang kehidupan di masa lampau dan hubungannya dengan kehidupan sekarang. Mereka menjelaskan informasi yang tersedia tentang evolusi dan bagaimana terbentuknya kehidupan.



Gambar 124. Bayi Mammoth yang terperangkap dalam es, diperkirakan hidup 22.000 tahun yang lalu.

(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

Tidak seperti di jaman Darwin, sekarang para ilmuwan dapat mengetahui umur fosil dan sisa-sisa organisme masa lampau ini untuk mendapatkan suatu gambaran yang lebih tepat ketika organisme-organisme yang berbeda berkembang. Kita masih belajar berbagai hal yang baru dari suatu sumber berharga yang secara harfiah berumur jutaan tahun.



(a)



(b)

Gambar 125. (a) Mineral menggantikan material tumbuhan untuk membentuk kayu yang membatu; (b) serangga terjatuh di dalam getah pohon, yang kemudian mengeras ke dalam batu amber

(sumber: [http:// evolution.berkeley.edu/evolibrary/](http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/))

ii. Distribusi Geografis Spesies (Biogeografi)

Bukti lain yang digunakan untuk menunjukkan garis keturunan evolusioner adalah distribusi geografis dari spesies. Sebagai contoh, hewan monotremata dan kebanyakan marsupialia (binatang berkantung) ditemukan hanya di Australia. Hal ini menunjukkan bahwa nenek moyang umum mereka, yaitu mamalia berplasenta hidup sebelum tenggelamnya jembatan daratan masa lampau antara Australia dan Asia.

Darwin memperoleh ide tentang evolusi pertama kali dari fenomena penyebaran geografis spesies. Darwin mencatat bahwa tumbuhan dan hewan di daerah beriklim sedang (temperata) Amerika Selatan lebih dekat kekerabatannya dengan spesies yang hidup di daerah tropis benua tersebut dibandingkan dengan spesies di daerah beriklim sama namun hidup di benua lain. Dengan demikian, penjelasan yang paling tepat adalah organisme yang ada di suatu pulau memiliki kekerabatan dengan organisme yang ada di pulau terdekatnya karena berkembang dari nenek moyang yang sama.

iii. Anatomi Perbandingan

Teori evolusi memprediksi bahwa keterkaitan organisme ditunjukkan dengan adanya kesamaan organ yang berasal dari nenek moyang umum. Bagian tubuh dengan struktur dasar yang sama dikenal sebagai homologi. Struktur homolog ditemukan pada organisme-organisme yang berbeda namun memiliki nenek

moyang umum yang sama. Homologi dapat dijelaskan dengan membandingkan anatomi dari makhluk hidup yang berbeda, yang terlihat dari kesamaan dan perbedaan sel, mempelajari perkembangan embrio, dan mempelajari struktur-struktur sisa (*vestigial structures*) pada individu suatu organisme.

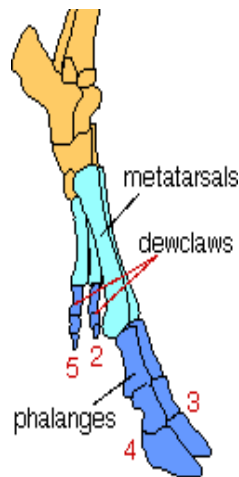
Beberapa jenis daun pada gambar 111 sangat berbeda dengan daun normal. Masing-masing daun memiliki bentuk dan fungsi yang berbeda, namun semua berasal dari struktur yang sama (homolog), yang berasal dari suatu bentuk *common ancestor*. Kantung semar dan *Venus flytrap* menggunakan daunnya untuk menangkap dan mencerna serangga. Daun merah cerah dari *Poinsettia* terlihat seperti kelopak bunga. Daun kaktus mengalami modifikasi menjadi duri-duri kecil sehingga dapat mengurangi laju kehilangan air dan dapat melindungi kaktus dari herbivor.



Gambar 126. Homologi pada daun
(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

Di dalam tubuh setiap organisme banyak terdapat bukti tentang sejarah kehidupan mereka dan penjelasan terbaik untuk keberadaan fitur ini adalah dengan evolusi. Beberapa hewan termasuk babi, sapi, rusa, dan anjing dalam perkembangannya telah mengurangi tulang-tulang jari kaki yang tidak berfungsi yang dikenal sebagai *deuclaws* (Gambar 112). Kaki babi kehilangan 1 tulang jari lengkap, tulang jari ke 2 dan 5 telah sangat tereduksi, dan hanya tulang jari 3 dan

4 yang mendukung tubuh. Penjelasan terbaik untuk organ vestigial bahwa organ-organ tersebut adalah sisa-sisa dari nenek moyang dengan jumlah yang hilang atau tereduksi jauh lebih banyak dari tulang jari fungsional. Bagian tubuh yang sama dalam fungsi tetapi berbeda dalam struktur dasar seperti sayap burung dengan sayap serangga, disebut struktur analog. Bagian tubuh ini tidak menunjukkan suatu hubungan evolusioner.



Gambar 127. "Dewclaws" organ vestigial pada beberapa hewan
(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

iv. Embriologi Perbandingan

Perkembangan suatu organisme, atau ontogeni, mungkin berisi petunjuk-petunjuk tentang sejarah yang dapat digunakan ahli biologi untuk membangun pohon evolusioner. Karakter-karakter yang berasal dari nenek moyang sering (tetapi tidak selalu) dipelihara dalam perkembangan suatu organisme. Sebagai contoh, embrio anak ayam dan manusia (Gambar 113) kedua-duanya mengalami suatu tahap di mana mereka mempunyai celah dan bangun lengkung di dalam leher mereka yang serupa dengan bangun lengkung dan celah insang dari ikan. Pengamatan ini mendukung gagasan bahwa ayam dan manusia memiliki nenek

moyang umum (*common ancestor*) yang sama dengan ikan. Dengan demikian, karakter-karakter perkembangan suatu organisme beserta bukti lainnya dapat digunakan untuk membangun *phylogeni*.

Organisme “Awal” Ekor Embrio Intermediet “Akhir” Bentuk
dewasa



Gambar 128. Karakter-karakter yang ditunjukkan oleh embrio mungkin menguraikan pola hubungan di antara garis keturunan.
(sumber: <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/>)

v. Biologi Molekuler

Hubungan evolusi di antara spesies dicerminkan dalam DNA dan proteinnya atau dalam gen dan produk gennya. Jika dua spesies memiliki pustaka gen dan protein dengan urutan monomer yang sangat bersesuaian, urutan itu pasti disalin dari nenek moyang yang sama. Biologi molekuler mendukung pemikiran Darwin yang paling berani, “*bahwa semua bentuk kehidupan saling berhubungan sampai tingkat tertentu melalui cabang-cabang keturunan dari organisme yang paling awal*”. Bahkan organisme yang secara taksonomi berbeda jauh seperti manusia dan bakteri, memiliki beberapa protein yang sama, misalnya sitokrom c, suatu protein yang terlibat dalam respirasi seluler pada semua spesies aerob. Dengan demikian, biologi molekuler telah menambahkan babak terbaru dari bukti-bukti bahwa evolusi adalah dasar kesatuan dan keanekaragaman kehidupan.

Perkembangan genetika molekuler, terutama sekali sekuensing DNA (urutan nukleotida pada DNA), telah membuat para ahli biologi mempelajari catatan evolusi dari struktur genetika organisme. Tingkat kesamaan dan perbedaan dalam urutan DNA dari spesies modern membuat ahli genetika dapat merekonstruksi garis keturunan mereka. Berdasarkan perbandingan urutan nukleotida DNA, tingkat kesamaan antara manusia dan simpanse adalah 98%.

D. Rangkuman

Studi evolusi dalam abad kedupuluh terus berlanjut dengan substansi yang semakin tinggi dan dengan metode serta alat yang semakin canggih. Kini evolusi bisa dikatakan telah menjadi teori sentral dalam biologi modern yang berhubungan secara langsung dengan topik-topik seperti asal-usul resistensi antibiotika pada bakteri, sosialitas pada serangga, dan keanekaragaman hayati dari kehidupan di Bumi. Pengembangan terbaru yang paling penting dalam biologi evolusi adalah meningkatnya pemahaman dan kemajuan dari genetika.

Sejak penerbitan *The Origin of Species* pada tahun 1859, teori evolusi telah menjadi sumber kontroversi yang hampir tetap. Secara umum, kontroversi memusat pada hal-hal yang bersifat filosofis, kosmologis, sosial, dan implikasi religius dari evolusi, bukan pada ilmu evolusi itu sendiri. Teori bahwa evolusi biologi terjadi melalui satu mekanisme hampir tidak ditentang dalam masyarakat ilmiah sejak awal abad ke-20.