

Evolusi Sel Sebagai Dasar Perkembangan Makhluk Hidup Saat ini.

Aprizal Lukman¹⁾

¹⁾ Program Studi Pendidikan Biologi, Jurusan P MIPA, FKIP Universitas Jambi Jl. Raya Jambi-Ma. Bulian Km. 15, Mendalo Darat, JAMBI 36124

ABSTRACT: Understanding the cell biology evolution theory is very important in studying recent creature development lately. Basically, creature evolution theories argue that animal, plant as well as human has been well developing from very simple forms. So far, Cell has been treated as unique structural and functional unit. Cell is also the smallest creature heredity unit

Keyword: cell evolution, organic molecule, protein synthesis, procariot, eukariot, hypothesis, endosimbiosis.

ABSTRAK: Pemahaman terhadap teori evolusi biologis sel sangat penting artinya untuk mengkaji tentang perkembangan makhluk hidup saat ini. Pada dasarnya teori evolusi makhluk hidup mengatakan bahwa hewan, tumbuhan dan manusia dalam berabad-abad yang lalu telah berkembang dari makhluk hidup yang berbentuk lebih sederhana. Selama ini sel dianggap merupakan unit struktural dan fungsional, sel juga merupakan unit hereditas yang paling kecil dari makhluk hidup.

Kata Kunci: evolusi sel, molekul organik, sintesis protein, prokariot, eukariot, hipotesis endosimbiosis.

PENDAHULUAN

Pada masa sekarang ini dapat dikatakan hampir semua ahli biologi dapat menerima *teori evolusi biologis* atau disingkat *teori evolusi*, walaupun teori tersebut disusun berdasarkan bukti-bukti tak langsung.

Pokok dari teori evolusi itu adalah bahwa hewan, tumbuhan, dan juga manusia dalam berbagai abad yang lalu telah berkembang dari makhluk yang berbentuk lebih sederhana. Semuanya itu melalui proses evolusi yang telah berlangsung beribu-ribu tahun, bahkan berjuta-juta tahun, dimulai dengan satu atau beberapa bentuk makhluk yang sederhana secara perlahan-lahan berkembang ke pelbagai bentuk (Widodo, 1989).

Teori sel antara lain menyatakan bahwa: 1) sel merupakan unit struktural dan fungsional yang paling kecil dari makhluk hidup, dan 2) sel merupakan unit hereditas yang paling kecil dari makhluk hidup (Robertis, 1988).

Pernyataan pertama mengandung arti bahwa sebuah sel dapat melakukan aktivitas hidup karena dilengkapi dengan "mesin" atau organel-organel untuk melakukan aktivitas tersebut, misalnya mitokondria, kloroplas, dsb. Sebagai unit hereditas berarti sel mengandung materi genetic (ADN) yang mengendalikan berbagai aktivitas sel. Dalam kenyataannya memang terdapat jenis-jenis organisme yang tubuhnya hanya tersusun dari satu sel (uniseluler), misalnya *Paramecium*, *Euglena* dan masih banyak yang lain. Alberts (1989) menyatakan bahwa setiap organisme dan semua sel yang membentuknya dipastikan berasal dari atau diturunkan oleh sejenis sel purba melalui evolusi.

Karena makhluk hidup dapat berupa sebuah sel tunggal, maka dalam pandangan evolusi, sel yang ada sekarang mestinya juga berkembang dari sel yang lebih sederhana, dan sel yang lebih sederhana tersebut juga merupakan hasil evolusi.

Luria (1978) memberi batasan makhluk hidup sebagai unit penerus keturunan (bahan genetik) yang berkembang sejalan dengan evolusi. Di dalam sel eukariot terdapat beberapa organel yang memiliki struktur seperti sel prokariot. Organel tersebut, yaitu mitokondria dan kloroplas, memiliki ADN dan ribosom yang memungkinkan mensintesis protein.

Kalau kita ikuti definisi Luria di atas dan juga kita bandingkan dengan struktur umum sel prokariot, maka dipandang dari sudut evolusi baik mitokondria maupun kloroplas kemungkinan semula merupakan semacam sel prokariot.

METODE PENULISAN

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah metode studi literatur, hal ini untuk mengetahui semua aspek yang diperlukan dari berbagai literatur. Selanjutnya setiap materi dianalisis secara kritis untuk dapat mengambil suatu pemahaman yang dapat menjelaskan maksud dari penulisan artikel ini.

PEMBAHASAN

Paparan di atas menunjukkan bahwa sel sebagai organisme maupun sebagai unit structural, fungsional

dan hereditas dari makhluk hidup, kelihatannya juga berevolusi dari bentuk-bentuk sederhana.

Makalah ini akan membahas evolusi sel, dugaan-dugaan mengenai bagaimana terbentuknya sel yang pertama, hipotesis asal usul mitokondria dan kloroplas; akan diungkap juga keterbatasan-keterbatasannya. Materi bahasan sebagian besar disarikan dari Bruce Alberts (1989).

Molekul-molekul Organik Berasal dari Molekul-molekul Anorganik

Membahas evolusi sel berarti membayangkan atau merekonstruksi mengenai keadaan bumi pada milyaran tahun yang lampau. Walaupun kondisi bumi pada awal-awal terbentuknya hingga kini masih menjadi bahan perdebatan, akan tetapi para ilmuwan agaknya setuju bahwa bumi pada masa itu merupakan suatu tempat yang ganas dengan letusan-letusan vulkanik, kilat dan hujan badai, oksigen bebas hanya sedikit, dan tidak ada lapisan ozon yang menyerap radiasi ultra ungu dari matahari.

Berdasarkan eksperimen di laboratorium terbukti bahwa pada kondisi seperti itu telah terbentuk molekul-molekul organik sederhana, yaitu molekul-molekul yang mengandung karbon. Berdasarkan percobaan Miller terbukti bahwa apabila gas CO₂, CH₄, NH₃ dan H₂ dicampur kemudian dipanaskan dan diberi energi melalui lecutan listrik (electrical discharge) atau radiasi ultra ungu, gas-gas tersebut akan bereaksi membentuk molekul-molekul organik kecil. Meskipun macam molekul yang terbentuk tidak beragam tetapi masing-masing molekul terbentuk dalam jumlah besar. Bila molekul-molekul tersebut berada di air akan mengalami reaksi-reaksi lebih lanjut membentuk lagi beberapa macam molekul, diantaranya adalah empat kelompok besar molekul-molekul organik kecil yang dijumpai dalam sel (Alberts, 1989).

Eksperimen yang dilakukan oleh Miller ini sebenarnya untuk membuktikan teori Oparin tentang asal usul kehidupan. Menurut Oparin, lautan dan bumi pada awal mulai terbentuk mengandung banyak sekali molekul-molekul organik yang kemudian saling bergabung membentuk kompleks-kompleks molekul yang lebih besar yang bersifat sementara (Kimball, 1991). Selanjutnya kompleks-kompleks molekul tersebut berimprovisasi hingga terbentuk sel pertama yang tentunya amat sederhana jika dibandingkan dengan sel yang ada sekarang.

Percobaan-percobaan lebih lanjut yang merupakan pengembangan penelitian Miller berhasil mensintesis unsur-unsur pokok lain pada benda hidup selain yang diperoleh Miller.

Pada 28 September 1969, di dekat Murchison, Australia, jatuh sebuah meteor yang setelah dianalisis secara kimiawi ternyata mengandung berbagai molekul organik yang sangat mirip dengan produk eksperimen Miller. Penelitian dari bidang radio astronomi telah pula menemukan adanya molekul-molekul organik di luar tata surya bumi (Kimball, 1991).

Jika kondisi planet dan tata surya di luar bumi diasumsikan seperti kondisi awal bumi ketika terbentuk, maka kandungan molekul organik pada meteor dan hasil riset radio astronomi di atas dapat menjadi bukti yang mendukung hasil percobaan Miller, dan akhirnya mendukung teori Oparin. Dengan demikian bentuk kehidupan yang pertama mungkin sekali berkembang dari molekul-molekul organik.

Sintesis Protein dan Terbentuknya Membran Sel

Molekul organik sederhana, seperti asam amino dan nukleotida yang telah terbentuk akan melakukan *polimerisasi* sehingga terbentuk molekul yang lebih besar. Kemampuan melakukan polimerisasi menurut Kimball (1991) merupakan salah satu ciri makhluk hidup. Replikasi ADN merupakan salah satu bentuk polimerisasi yang terjadi pada semua sel.

Asam-asam amino saling bergabung melalui ikatan peptide membentuk polipeptida, sedangkan nukleotida-nukleotida bergabung melalui ikatan fosfodiester membentuk polinukleotida. Di dalam sel masa kini, polipeptida dikenal sebagai protein dan polinukleotida dalam bentuk ARN dan ADN, merupakan unsur-unsur yang sangat penting di dalam sel. Dalam percobaan di laboratorium yang dikondisikan seperti keadaan bumi saat masih baru terbentuk, polimerisasi asam amino maupun nukleotida berlangsung dengan urutan acak dan dengan panjang yang beragam.

Polimerisasi yang terbentuk, khususnya polinukleotida dapat menjadi *template* (cetakan) bagi terbentuknya polinukleotida baru. Polinukleotida baru cenderung membentuk ikatan dengan polinukleotida cetakannya. Sebaliknya polinukleotida komplementer dapat pula menjadi cetakan bagi polinukleotida asli. Dengan melalui mekanisme seperti itu maka urutan nukleotida yang asli dapat tetap dilestarikan.

Mekanisme tersebut merupakan inti proses pengalihan informasi dalam sistem biologi. Seperti diketahui informasi genetik di dalam sel berupa urutan nukleotida yang terdapat dalam polinukleotida diwariskan melalui proses replikasi.

Replikasi ADN yang berlangsung di dalam sel memerlukan katalisator berupa enzim misalnya ADN polimerase. Akan tetapi pada zaman pra-biotik enzim diyakini belum ada, sehingga diperkirakan ion-ion logam

dan mineral berperan sebagai katalisator. Selain itu, dan ini yang terpenting, ARN itu sendiri berperan sebagai katalisator (*otokatalitik*).

Selanjutnya molekul-molekul ARN mulai terlibat mengatur sintesis polipeptida atau yang sekarang lebih dikenal dengan sintesis protein. Sebuah molekul ARN berperan membawa informasi genetik untuk polipeptida tertentu dalam suatu kode (sekarang diperankan ARN transfer). Kedua macam molekul ARN ini membentuk pasangan-pasangan komplementer sehingga memungkinkan ARN pembawa informasi genetik mengatur penggabungan asam-asam amino yang dibawa molekul ARN adaptor menjadi rantai polipeptida.

Dibandingkan dengan proses sintesis protein yang dikenal sekarang, perakitan polipeptida pada zaman pra-biotik amatlah sederhana, tetapi dengan cara itu dapat dibentuk protein-protein yang akan berperan dalam proses-proses yang lebih rumit. Kode genetik untuk mensintesis polipeptida yang dikenal sekarang ternyata sifatnya universal, artinya kode genetik itu berlaku sama pada semua makhluk hidup. Ini dapat menjadi petunjuk bahwa semua sel yang da sekarang berevolusi dari sejumlah sel primitif.

Molekul-molekul ARN baik pembawa informasi maupun adaptor, dalam kondisi campur aduk. Akibatnya protein hasil sintesis dapat digunakan atau dapat direbut oleh ARN yang lain. Pada saat inilah mulai diperkirakan mulai berkembang selaput sel sehingga molekul-molekul ARN terwadahi di dalam suatu gelembung dilapisi membran. Selaput sel sederhana itu disusun oleh molekul yang bersifat *amfipatik*, yaitu terdiri dari bagian *hidrofobik* (tidak larut dalam air) dan bagian *hidrofilik* (larut dalam air). Pembentukan selaput ini dapat diperagakan dengan mencampurkan fosfolipid dengan air di dalam sebuah tabung dalam kondisi yang tepat. Molekul-molekul amfipatik tersebut akan menggumpal sedemikian rupa sehingga bagian yang hidrofob saling saling merapat dengan sesamanya, sedangkan bagian yang hidrofilik merapat dengan air. Gumpalan-gumpalan molekul amfipatik, kemudian saling bergabung membentuk gelembung kecil berlapis ganda. Lapisan ganda itu mengisolasi air di dalam gelembung dari medium di sebelah luar.

Membran sel masa kini juga tersusun dari molekul-molekul amfipatik terutama fosfolipid. Pada umumnya banyak yang sepakat bahwa sintesis protein telah berlangsung sebelum terbentuk sel (membran). Setelah terbungkus membran, protein-protein produk ARN akan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan pengembangan sel itu sendiri. Dengan demikian rangkaian nukleotida dalam molekul-molekul ARN dapat terekspresi untuk karakter sel secara utuh.

Pada sel masa kini informasi genetik disimpan dalam molekul ADN. Pada sel purba, informasi genetik diyakini disimpan dalam molekul ARN. Dengan kata lain, ARN muncul lebih dahulu, sekaligus mempunyai sifat genetik dan katalitik. Dibandingkan dengan ADN, molekul-molekul ARN lebih labil. Sifat yang lebih labil memang diperlukan dalam proses evolusi yaitu agar lebih gampang terjadi variasi genetik dan melaksanakan fungsi katalitik. Setelah terbentuknya membran sel, sintesis protein berkembang menjadi lebih efisien, maka saatnya ADN mengambil alih fungsi genetik karena ADN lebih mantap untuk menyimpan informasi genetik yang semakin banyak dan kompleks. Protein-protein berfungsi sebagai katalisator, sementara ARN tetap berperan penting dalam sintesis protein (ARN ribosom, SRN transfer dan ARN duta).

Perkembangan Dari Prokariot Sampai Eukariot

Di dalam sel bakteri, salah satu prokariot, telah berlangsung reaksi-reaksi yang cukup rumit, bahkan tiga reaksi penting untuk memperoleh energi yaitu glikolisis, respirasi dan fotosintesis yang berlangsung pada eukariot juga dapat dilakukan sejumlah bakteri.

Ketika sel purba baru terbentuk, reaksi metabolik yang rumit itu belum dapat dilakukan sel, atau lebih tepatnya sel belum memerlukan, karena sel dapat mengambil molekul-molekul yang diperlukan langsung dari lingkungan yang pada masa itu memang kaya bahan organik. Akan tetapi lama-kelamaan bahan organik di lingkungan semakin berkurang. Sebagian sel mulai membentuk enzim-enzim agar dapat membentuk sendiri molekul-molekul organik. Sejalan dengan bertambahnya waktu enzim-enzim di dalam sel semakin beragam jenisnya sehingga reaksi-reaksi metabolic di dalam sel juga semakin kompleks.

Terdapat hirarki dalam evolusi pembentukan enzim-enzim metabolic. Enzim untuk sintesis molekul-molekul dasar mestinya terbentuk lebih dahulu disusul enzim-enzim yang lain; yang paling mendasar kemungkinan sekali adalah enzim-enzim untuk glikolisis karena proses degradasi atau penguraian gula ini dapat berlangsung tanpa O₂ (secara anaerob). Dugaan ini sesuai dengan keadaan awal bumi yang sedikit mengandung O₂. Glikolisis sangat penting karena menghasilkan energi (ATP) yang digunakan untuk aktivitas sel.

Enzim-enzim metabolik dasar sambil tetap menjalankan fungsinya terus mengalami modifikasi sehingga enzim-enzim semakin beragam sejalan dengan perkembangan sel. Oleh sebab itu urutan asam amino pada enzim yang sama dari 2 spesies berbeda dapat dipakai petunjuk untuk menentukan hubungan kekerabatan kedua spesies tersebut.

Seperti dikemukakan di atas pada akhirnya persediaan molekul organik di alam akan habis; oleh sebab itu, agar tetap bertahan hidup, sel harus dapat memanfaatkan atom-atom karbon dan nitrogen darim CO₂ dan N₂ di atmosfer untuk diubah menjadi molekul organik; maka muncullah Cyanobacteria yang mampu mengikat serta mengubah CO₂ dan N₂ menjadi molekul-molekul organik. Melalui fotosintesis ganggang biru hijau bersama bakteri-bakteri lain yang memiliki kemampuan serupa, menciptakan kondisi-kondisi yang memungkinkan organisme-organisme yang lebih kompleks dapat hidup dan berkembang dengan memanfaatkan produk fotosintesis, bahkan memakan "pelaku" fotosintesis itu sendiri.

Munculnya sel autotrof yang memiliki kemampuan fotosintesis menimbulkan revolusi pada kondisi atmosfer bumi yang akhirnya berimplikasi pada kehidupan di bumi itu sendiri. Atmosfir bumi yang semula sangat miskin O₂ menjadi mengandung banyak oksigen yang berasal dari produk fotosintesis. Keberadaan O₂ yang cukup banyak atmosfer mendorong berkembangnya proses respirasi secara anaerob di dalam sel yang memungkinkan sel dapat mengoksidasi molekul-molekul organik dengan lebih tuntas. Dengan melalui oksidasi aerob, energi yang dapat dimanfaatkan dari setiap gram glukosa jauh lebih banyak dibandingkan melalui oksidasi anaerob.

Pada satu sisi kehadiran O₂ di atmosfer membawa dampak positif bagi evolusi sel, tetapi pada sisi lain menjadi racun bagi sel-sel anaerob karena sifat O₂ yang sangat reaktif sehingga dapat berinteraksi dengan hamper semua unsur pembentuk sitoplasma. Akibatnya tidak sedikit sel-sel anaerob yang punah, tetapi ada pula yang tetap bertahan hidup secara anaerob dengan menempati habitat yang tidak mengandung oksigen. Sebagian yang lain mengembangkan kemampuan respirasi aerob selain dapat berespirasi anaerob (fakultatif anaerob) sehingga tetap survive hingga sekarang misalnya sel *Saccharomyces*.

Cara lain yang brilliant yang dilakukan sel anaerob agar tetap bertahan hidup adalah dengan membentuk persekutuan yang erat (simbiosis) dengan sel-sel aerob. Bentuk-bentuk simbiosis antara sel anaerob dan sel-sel aerob dalam perkembangannya akan melahirkan sel eukariot.

Sel eukariot diyakini berkembang dari sel prokariot anaerob. Selaput inti diperkirakan berkembang dari penjurulan ke dalam dari membran sel.

Hipotesis Endosimbiosis

Di dalam sel-sel eukariot terdapat organel-organel yang masing-masing memiliki fungsi khusus. Dua diantaranya adalah mitokondria yang berfungsi untuk respirasi dan kloroplas untuk fotosintesis. Mitokondria

hamper selalu terdapat pada sel-sel eukariot, sedangkan kloroplas hanya dijumpai dalam sel-sel eukariot yang dapat melakukan fotosintesis (tumbuhan).

Di dalam "Cell Biology" (Thorpe, 1984) diungkap beberapa persamaan antara mitokondria dengan sel bakteri aerob. Baik mitokondria maupun sel bakteri aerob sama-sama memiliki ADN dan ribosom. ADN mitokondria banyak yang berbentuk sirkuler, seperti bentuk ADN bakteri. Ukuran ribosom keduanya juga hampir sama, lipatan-lipatan ke dalam dari membran dalam mitokondria (cristae) memiliki fungsi yang sama dengan lipatan-lipatan ke dalam dari membran plasma sel bakteri (mesosom), yaitu tempat berlangsungnya respirasi. Selain itu translasi yang berlangsung pada mitokondria maupun sel bakteri sama-sama dapat dihambat oleh khloramfenikol (sejenis antibiotik). Mitokondria seperti halnya bakteri dapat memperbanyak diri dengan membelah.

Karena persamaan-persamaan tersebut muncul dugaan-dugaan mengenai asal usul mitokondria di dalam sel eukariot. Salah satu pendapat yang banyak diterima adalah hipotesis endosimbiosis. Menurut hipotesis ini pada mulanya mitokondria adalah sejenis prokariot aerob yang kemudian dicaplok oleh sel eukariotik yang anaerob. Sel eukariot anaerob ini diperkirakan berkembang dari sel-sel anaerob ini diperkirakan berkembang dari sel-sel anaerob primitif yang berhasil bertahan hidup ketika O₂ di bumi bertambah banyak; pada akhirnya sel prokariotik aerob tersebut menjadi organel mitokondria, dan sel eukariot yang semula anaerob menjadi aerob.

Beberapa mikroorganisme yang hidup pada masa kini dapat menjadi bukti yang mengandung hipotesis ini. Di dalam usus hewan terdapat spesies eukariot bersel tunggal yang tidak mempunyai mitokondria dan hidup dalam kondisi kurang O₂, jadi mirip dengan sel eukariot anaerob yang primitif. *Pelomyxa palustris*, sejenis Amoeba walaupun tidak memiliki mitokondria tetap dapat melakukan oksidasi karena memelihara sejenis bakteri aerob di sitoplasmanya dalam suatu hubungan yang permanen.

Secara struktural dan fungsional, struktur sebagian kloroplas mirip sekali dengan *Cyanobacteria*. Susunan tilakoid pada kloroplas mirip sekali dengan lamella pada *Cyanobacteria*, ADN keduanya sama-sama berbentuk sirkuler, dan hampir tidak dapat dibedakan urutan nukleotida antara keduanya. Keduanya juga sama-sama memiliki ribosom yang ukurannya hampir sama. Selain itu baik kloroplas maupun *Cyanobacteria* dapat memperbanyak diri dengan membelah. Oleh sebab itu timbul dugaan bahwa kloroplas maupun *Cyanobacteria* memiliki/berkembang dari nenek moyang sel yang sama.

Sama seperti dengan asal usul mitokondria, asal usul kloroplas di dalam sel eukariot juga dijelaskan dengan hipotesis endosimbiosis. Sel eukariot primitif heterotrof menelan sel prokariot autotrof sehingga terjadi simbiosis abadi. Ternyata di antara sel-sel eukariot yang hidup sekarang ada yang bersimbiosis permanen dengan *Cyanobacteria*. Dalam bentuk persekutuan kedua organisme itu disebut *Cyanophora paradoxa*.

Keterbatasan-keterbatasan

Berdasarkan paparan di atas, secara umum dapat dipahami bahwa memang sangat mungkin sekali bahwa sel-sel yang ada sekarang baik prokariot maupun eukariot, berkembang atau merupakan hasil evolusi dari beberapa sel sederhana/primitif dan sel pertama dibentuk dari molekul organik yang merupakan hasil reaksi molekul-molekul anorganik.

Sebagian dugaan atau hipotesis untuk menjelaskan evolusi dapat dibuktikan melalui eksperimen di laboratorium walaupun kondisi laboratorium tidak sepenuhnya dapat mewakili kondisi bumi saat baru terbentuk; sebagian dugaan yang lain semata-mata teoritis, dan ada juga bukti-bukti di masa sekarang yang mendukung evolusi sel.

Meskipun demikian, masih banyak hal yang belum dijelaskan sekalipun dengan hipotesis. Beberapa diantaranya dibahas berikut ini.

1. salah satu sifat asam nukleat (ARN dan ADN) adalah dapat mengalami denaturasi, yaitu terurai menjadi komponen-komponen penyusunnya (Watson, 1983). Salah satu penyebab denaturasi adalah suhu yang mendekati titik didih. Akan tetapi ADN atau ARN yang mengalami denaturasi dapat direnatursasi jika suhu diturunkan sampai 60°C. Pada saat bumi baru terbentuk, diperkirakan suhu bumi amat tinggi. Saat itu pula diperkirakan mulai terbentuk asam nukleat (ARN). Padahal ARN dapat mengalami denaturasi pada suhu tinggi. Renaturasi ARN menurut Watson (1983) dapat menghasilkan urutan nukleotida yang berbeda dengan urutan ARN sebelum mengalami denaturasi. Jadi ARN yang mengalami denaturasi ketika suhu bumi makin panas akan mengalami renaturasi lagi (ketika suhu bumi semakin turun) dengan urutan nukleotida yang bervariasi. Dengan demikian denaturasi ARN akibat suhu bumi yang tinggi dari segi evolusi sebenarnya menimbulkan variasi genetik. Yang masih belum dapat dijelaskan adalah bagaimana ARN yang baru terbentuk dapat tetap bertahan dalam kondisi suhu yang tinggi.
2. Peralihan molekul pembawa informasi genetik dari ARN ke ADN juga masih belum dapat dijelaskan. Akan tetapi barangkali mekanismenya seperti jalur

informasi genetik pada virus yang asam nukleatnya ARN. Adapun jalurnya adalah: ARN \longrightarrow ADN \longrightarrow ARN duta \longrightarrow translasi (Watson, 1983). Pembentukan ADN dari ARN dikatalisir oleh enzim transkripsi balik (reverse transcriptase). Boleh jadi pembentukan ADN dari ARN pada proses evolusi dikatalisir oleh semacam enzim transkripsi balik.

3. Hipotesis endosimbiosis yang menjelaskan asal usul mitokondria dan kloroplas di dalam sel eukariot, walaupun didukung oleh beberapa bukti yang ada sekarang, masih memiliki keterbatasan. Kalau kloroplas dan mitokondria berasal dari sel prokariot yang bersimbiosis dengan sel eukariot, maka baik kloroplas maupun mitokondria seharusnya dapat mencukupi sendiri kebutuhan proteinnya. Dalam kenyataannya tidak demikian. Kloroplas dan mitokondria bersifat semiotonom. ADN yang dimiliki tidak dapat mensintesis semua protein yang diperlukan, sebagian protein masih diambil dari sitoplasma yang sintesisnya dikendalikan ADN inti (Robertis, 1988 dan Thorpe, 1984). Pada mitokondria, enzim ADN polymerase (untuk replikasi) dan ARN polymerase (untuk transkripsi) masih diambil dari sitoplasma. Apakah hal ini berarti sebagian nukleotida kloroplas atau mitokondria terbawa oleh ADN inti atau bagaimana, hipotesis yang ada masih belum dapat menjelaskan. Selain itu, belum ada penjelasan tentang bagaimana terbentuknya DNA yang double helix.
4. Selain mitokondria dan kloroplas, masih banyak organel yang lain di dalam sel eukariot, yaitu retikulum endoplasma, kompleks Golgi, lisosom peroksisom, ribosom. Di dalam sitoplasma sel eukariot juga terdapat kerangka sel yang terdiri dari filamen-filamen halus. Belum ada penjelasan bagaimana evolusi organel-organel dan kerangka tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagaimana tertera di bawah ini.

1. Sel yang ada sekarang merupakan hasil evolusi dari sel yang lebih sederhana.
2. Sel pertama berkembang dari molekul-molekul organik yang ada pada saat bumi baru terbentuk. Molekul-molekul organik tersebut merupakan hasil reaksi dari molekul-molekul anorganik.
3. Informasi genetik pertama kali dibawa oleh molekul ARN kemudian beralih ke ADN.
4. Munculnya organisme autotrof menimbulkan perubahan cara respirasi dari anaerob menjadi

- aerob. Sebagian sel anaerob tetap bertahan hingga sekarang.
5. Sel eukariot berkembang dari sel prokariot anaerob primitif. Simbiosis dengan sel prokariot aerob melahirkan sel eukariot aerob. Simbiosis dengan prokariot autotrof menghasilkan sel eukariotik autotrof.
 6. Masih banyak hal-hal yang dalam evolusi sel yang belum dapat dijelaskan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, Bruce, *et.al.* 1989. *Molecular Biology of The Cell*. New York: Garland Publishing, Inc.
- Robertis, E.D.P., and Robertis, Jr. E.M.F. 1988. *Cell and Molecular Biology*. (Eight Edition). Hongkong: Info-Med.
- Kimball, J. W. 1991. *Biologi*. (jilid 3). Terjemahan oleh Tjitrosomo, S.S. dan Sugiri, N. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Luria, Salvador E. *et.al.* 1978. *General Virology*. (Third Edition). New York: John Willey and Sons.
- Thorpe, Neal O. 1984. *Cell Biology*. New York: John Wiley & Sons.
- Watson, James D., John Tooze, David T Kurtz. 1983. *Recombinant DNA*. Terjemahan oleh Wisnu Gunarso. Jakarta: Erlangga.
- Widodo. 1989. *Teori Evolusi Biologis*. Malang: IKIP MALANG.