



Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd., merupakan lulusan Program Doktor (S-3) pada Pascasarjana Universitas Padjadjaran Bandung. Saat ini penulis menjadi staf pengajar Program Studi Pendidikan Biologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung, dengan mengampu mata kuliah Biologi Umum, Biologi Sel, Bioteknologi dan Seminar Pendidikan Biologi.

## BIOLOGI **SEL**

Evolusi sains seringkali berada sejajar dengan penemuan peralatan yang memperluas indra manusia untuk bisa memasuki batas-batas penemuan baru. Penemuan dan kajian awal tentang sel telah memperoleh kemajuan yang cukup signifikan sejalan dengan penemuan dan penyempurnaan mikroskop pada abad ke-17.

Buku ini membahas berbagai kegiatan yang berkaitan dengan bidang biologi sel dan biologi molekuler, baik sel manusia, hewan, maupun tumbuhan. Selain uraian dan penjelasan tentang konsep-konsep sel, dilengkapi pula dengan soal-soal yang sengaja disiapkan sebagai latihan bagi para pembacanya.

Melalui buku ini, mahasiswa, calon guru, dan/atau para guru biologi diharapkan bisa memahami mengenai ultra struktur organel-organel sel beserta fungsinya.

 cendekia

[www.cendekiapress.com](http://www.cendekiapress.com)  
penerbitcendekiapress  
cendekiapress  
cendekiapress

ISBN 978-623-7438-83-0



9 786237 438830

 cendekia

**BIOLOGI **SEL****

Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.



Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.

# BIOLOGI **SEL**

 cendekia



Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.

# BIOLOGI SEL

cendekia

Penerbit Cendekia Press - Bandung

# BIOLOGI SEL

*Copyright © 2020 – Tuti Kurniati*

Penulis: Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.

Editor: Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.

Desainer Sampul: Team Cendekia

Penata Letak: Team Cendekia

---

CP.PK074-2020

ISBN: 978-623-7438-83-0

Cetakan pertama, Mei 2020

---

Diterbitkan oleh:

**CV CENDEKIA PRESS**

NIB: 8120107982776

Komp. GBA Barat Blok C-4 No. 7 Bandung

Email: [penerbit@cendekiapress.com](mailto:penerbit@cendekiapress.com)

Website: [www.cendekiapress.com](http://www.cendekiapress.com)

Anggota IKAPI No 328/jba/2018

---

Hak cipta dilindungi undang-undang pada penulis, dan hak penerbitan pada CV Cendekia Press. Dilarang memperbanyak tulisan ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari Penerbit.



# Pengantar

**P**uji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat Menyusun buku yang berjudul *Biologi Sel*.

Melalui buku ini diharapkan mahasiswa, calon guru dan para guru biologi memahami mengenai ultra struktur organel-organel sel beserta fungsinya.

Ruang lingkup dalam buku ini terbatas pada kegiatan yang berkaitan dengan bidang biologi sel dan biologi molekuler. Selain uraian dan penjelasan konsep-konsep, terdapa soal-soal yang sengaja disiapkan sebagai latihan bagi pembaca.

Tidak lupa penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan motivasi kepada penulis dalam proses penyusunan buku ini. Semoga Allah SWT, membalasnya dengan pahala yang berlipat ganda, Amin.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran, dan kritik demi penyempurnaan buku ini selalu diharapkan. Akhir kata semoga buku ini dapat bermanfaat.

Bandung, April 2020

**Penulis**



# Daftar Isi

**Pengantar — iii**

**Daftar Isi — v**

**Bab I      Pendahuluan — 1**

- A. Sejarah Penemuan Sel — 1
- B. Perkembangan Teori Sel — 3
- C. Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik — 5
- D. Bagaimana Mempelajari Sel — 13

**Bab II     Virus — 23**

- A. Struktur Virus — 23
- B. Serangan Virus Terhadap Bakteri — 27
- C. Reproduksi Virus — 28
- D. Pertanyaan Diskusi — 32

**Bab III    Struktur dan Fungsi Membran Plasma  
(Plasmalemma) — 33**

- A. Pendahuluan — 33
- B. Struktur Membran Plasma — 38

- C. Fungsi Membran Sel — 42
- D. Transpor pada Membran Sel — 43
- E. Pertanyaan Diskusi — 56

**Bab IV Badan Mikro — 57**

- A. Pendahuluan — 57
- B. Struktur — 58
- C. Komposisi Kimia dan Permeabilitas Badan Mikro — 60
- D. Fungsi — 61
- E. Pertanyaan Diskusi — 64

**Bab V Nukleus — 65**

- A. Pendahuluan — 65
- B. Struktur Nukleus — 65
- C. Materi Genetik — 69
- D. Replikasi DNA — 73
- E. Pertanyaan Diskusi — 78

**Bab VI Organel dalam Sitoplasma yang Berfungsi untuk Sintesis Protein, Sekresi dan Absorpsi — 79**

- A. Pendahuluan — 79
- B. Struktur Ribosom, RE, Golgi Kompleks dan Lisosom — 81
- C. Pertanyaan Diskusi — 112

**Bab VII Organel Pembangkit Tenaga — 113**

- A. Kloroplas — 113
- B. Mitokondria — 123

<b>Bab VIII</b>	<b>Sitosol dan Sitoskeleton</b>	<b>— 139</b>
	A. Pendahuluan	— 139
	B. Komponen Penyusun Sitoskeleton	— 141
	C. Pertanyaan Diskusi	— 152
<b>Bab IX</b>	<b>Pelekatan Sel (<i>Cell Junction</i>)</b>	<b>— 153</b>
	A. Pendahuluan	— 153
	B. Struktur Pelekatan Sel	— 154
	C. Pertanyaan Diskusi	— 166
<b>Bab X</b>	<b>Komunikasi Antarsel</b>	<b>— 167</b>
	A. Pendahuluan	— 167
	B. Jenis-Jenis Komunikasi Sel	— 169
	C. Tahap Pensinyalan	— 175
	D. Pertanyaan Diskusi	— 182
<b>Bab XI</b>	<b>Pembelahan Sel</b>	<b>— 183</b>
	A. Pendahuluan	— 183
	B. Pembelahan Secara Mitosis	— 185
	C. Pembelahan secara Meiosis	195
	D. Pertanyaan Diskusi	— 203
<b>Bab XII</b>	<b>Sel-Sel Penghasil Keturunan</b>	<b>— 205</b>
	A. Pendahuluan	— 205
	B. Keuntungan Reproduksi Seksual	— 207
	C. Meiosis	— 210
	D. Telur	— 213
	E. Sperma	— 219
	F. Pertanyaan Diskusi	— 222



**Bab XIII Fertilisasi — 223**

- A. Pendahuluan — 223
- B. Fertilisasi Eksternal dan Fertilisasi Internal — 224
- C. Interaksi Sperma dan Sel Telur — 226
- D. Reaksi Zona — 228
- E. Aktivitas Sperma dalam Sel Telur — 235
- F. Pertanyaan Diskusi — 238

**Daftar Pustaka — 239**

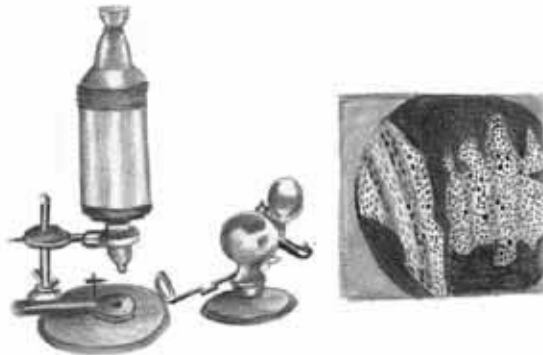
**Tentang Penulis — 243**

## Bab I

# Pendahuluan

## A. Sejarah Penemuan Sel

Istilah sel pertama kali dikemukakan oleh Robert Hooke (1667) pada saat mengamati sayatan gabus dengan mikroskop. Ia melihat adanya ruangan-ruangan kecil yang disebutnya cella yang berarti kamar kecil (gambar 1.1).



**Gambar 1.1**

Sayatan Gabus yang dilihat di bawah Mikroskop Robert Hooke  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Evolusi sains seringkali berada sejajar dengan penemuan peralatan yang memperluas indera manusia untuk bisa memasuki batas-batas penemuan baru. Penemuan dan kajian awal tentang sel memperoleh kemajuan sejalan dengan penemuan dan penyempurnaan mikroskop pada abad ke-17. Sehingga mikroskop sejak awal tidak dapat dipisahkan dengan sejarah penemuan sel, yang dijelaskan sebagai berikut:

Galileo Galilei (abad 17) dengan alat dua lensa menggambarkan struktur tipis dari mata serangga. Galilei sebenarnya bukan seorang biologiwan pertama yang mencatat hasil pengamatan biologi melalui mikroskop. Robert Hook (1635-1703) melihat gambaran satu sayatan tipis gabus suatu kompartemen atau ruang-ruang disebut dengan nama latin *cellulae* (ruangan kecil), asal mula nama sel. Anton van Leeuwenhoek (24 Oktober 1632–26 Agustus 1723), menggunakan lensa-lensa untuk melihat beragam spermatozoa, bakteri dan protista. Robert Brown (1733-1858) pada tahun 1820 merancang lensa yang dapat lebih fokus untuk mengamati sel. Titik buram yang selalu ada pada sel telur, sel polen, sel dari jaringan anggrek yang sedang tumbuh. Titik buram disebut sebagai nukleus. Ahli botani Pada tahun 1838 Matthias Schleiden dan ahli zoologi Theodor Schwan keduanya tertarik dengan adanya kesamaan yang terdapat pada struktur jaringan tumbuhan dan hewan, mereka mengajukan konsep bahwa semua organisme tersusun atas sel dan sel merupakan struktural makhluk hidup. H.J. Dutrochet (1824) menemukan bahwa semua tumbuhan dan hewan terdiri dari sel berbentuk gelembung yang sangat kecil. Felix Dujardin (1835)

mengemukakan bahwa isi sel tersebut berupa cairan yang oleh Johannes Purkinje (1840) dan Hugo Van Mohl (1846) menyebutnya dengan istilah protoplasma. Hugo von Mohl bersama Karl Nugeli (1835) mempelajari peristiwa pembelahan sel. Mereka berkesimpulan bahwa inti dan plasma sel mengalami pembelahan untuk menjadi 2 sel anak.

R. Virchow (1859) berkesimpulan bahwa semula sel berasal dari sel yang telah lebih dulu ada dengan istilah *omnis cellulae cellula*. Lewat pembelahan sel itulah bahan genetika (hereditas) diwariskan kepada keturunan dari satu generasi ke generasi berikutnya. E. Straburger dan W. Flemming (1870) berkesimpulan bahwa inti sel memelihara kelangsungan hidup suatu jenis makhluk dari satu generasi ke generasi berikutnya. Flemming mengenal istilah mitosis bagi pembelahan sel. O. Hertwig (1875) membuktikan bahwa inti spermatozoa bersatu dulu dengan inti ovum untuk terjadinya embrio atau generasi baru. W. Schultze (1860) mengatakan bahwa protoplasma adalah dasar fisik seluruh kehidupan. Protoplasma dibagi atas unit dalam sel yang terdiri dari 2 daerah yaitu :

1. Sitoplasma (Plasma sel)
2. Nukleoplasma atau karioplasma

## B. Perkembangan Teori Sel

Beberapa ahli telah mencoba menyelidiki tentang struktur dan fungsi sel, dan kemudian muncul beberapa teori tentang sel. Sejarah ditemukannya teori tentang sel

diawali penemuan mikroskop yang menjadi sarana untuk mempermudah melihat struktur sel. Berbagai penelitian para ahli biologi, antara lain seperti berikut.

1. *Teori sel menurut Schleiden & T.Schwann.*

Schleiden berpendapat bahwa setiap tubuh tumbuhan tersusun atas sel sedangkan Schwann berpendapat bahwa setiap tubuh hewan tersusun atas sel. Dari kedua pendapat tersebut dapat di simpulkan bahwa sel merupakan unit struktural (penyusun) tubuh organisme.

2. *Teori sel menurut Max Schultze.*

Max Schultze berpendapat bahwa protoplasma merupakan struktur dasar organisme dan merupakan bagian penting dari sel. Pendapat ini mendapat dukungan dari Felix Dujardin yang menyatakan bahwa protoplasma merupakan cairan hidup yang terdapat di dalam sel hidup.

Di dalam protoplasma terdapat organel yang berfungsi melaksanakan fungsi hidup (bernafas, tumbuh, berkembang). Maka muncul teori yang menyatakan bahwa sel merupakan unit (kesatuan) fungsional. Sel tidak hanya penyusun tubuh organisme tetapi juga pelaksana hidup, dengan demikian fungsi hidup di laksanakan oleh sel.

3. *Teori sel menurut Rudolf Virchow.*

Rudolf Virchow menyatakan bahwa sel berasal dari sel sebelumnya. Sel di dalam tubuh organisme di samping memiliki kemampuan membelah juga memiliki kemampuan tumbuh. Berdasarkan hal tersebut dapat di simpulkan bahwa sel merupakan unit pertumbuhan.

4. *Teori sel sebagai akibat perkembangan teknologi.*

Setelah ditemukannya alat bantu canggih dan cara pewarnaan bagian sel, bagian dalam protoplasma dapat diketahui sehingga ditemukan berbagai organel (inti sel, mitokondria, ribosom, kromosom dll). Perkembangan selanjutnya diketahui bahwa di dalam kromosom terdapat faktor pembawa sifat (gen). Kemudian muncul teori yang menyatakan bahwa sel merupakan unit (kesatuan) hereditas.

Kehidupan suatu organisme diawali oleh satu sel (zigot). Zigot melakukan pembelahan sehingga terjadi pertumbuhan membentuk embrio, di dalam embrio, sel mengalami berbagai spesialisasi fungsi dan bentuk sel yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa sel sebagai satuan struktural atau dengan kata lain dari semua teori tersebut dapat disimpulkan menjadi tiga konsep yaitu (1) semua organisme tersusun atas satu sel atau lebih sel, (2) sel adalah unit terkecil yang memiliki semua persyaratan hidup, dan (3) keberlangsungan kehidupan berasal dari pertumbuhan dan pembelahan sel.

## C. Sel Prokariotik dan Sel Eukariotik

Sel merupakan unit terkecil dari makhluk hidup yang berarti sel mampu atau dapat tetap hidup tanpa kehadiran sel lain. Sel merupakan struktur terkecil yang mampu melakukan pertumbuhan dan reproduksi. Struktur sel dibagi menjadi struktur sel prokariotik dan eukariotik. Selain itu akan dibahas pula sel tumbuhan. Sel tumbuhan termasuk sel

eukariotik, tetapi karena pada sel tumbuhan memiliki organel yang khas, maka akan dibahas tersendiri.

## 1. Struktur Sel Prokariotik

Semua sel prokariotik mempunyai membran plasma nukleoid (berupa DNA dan RNA) dan sitoplasma yang mengandung ribosom. Sel prokariotik tidak memiliki membran inti. Ciri-ciri lain pada sel prokariotik adalah tidak memiliki sistem endomembran seperti pada retikulum endoplasma dan kompleks golgi. Selain itu sel prokariotik juga tidak memiliki mitokondria dan kloroplas. Contoh sel prokariotik adalah bakteri dan ganggang biru. Berikut akan diuraikan bagian-bagian tubuh sel *E.coli* yang meliputi dinding sel, membran plasma, sitoplasma, masosom, ribosom, DNA dan flagella (gambar 1.2).

### a. Dinding sel

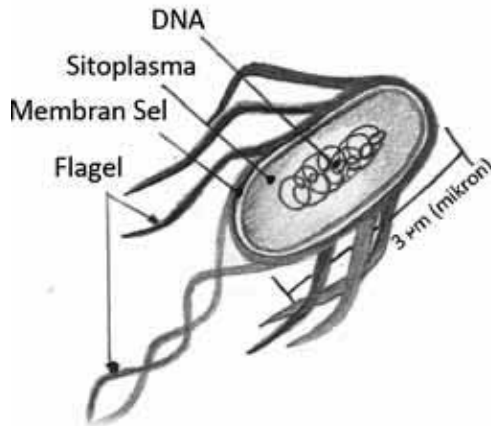
Dinding sel tersusun atas poliskarida, lemak dan protein. dinding sel berfungsi sebagai pelindung dan memberi bentuk yang tetap.

### b. Membran plasma

Membran sel atau membran plasma tesusun atas molekul lemak dan protein. fungsinya sebagai pelindung molekuler terhadap lingkungan di sekitarnya.

### c. Sitoplasma

Sitoplasma tersusun atas air, protein, lemak, mineral, dan enzim-enzim



**Gambar 1.2** *E coli* dan bagian-bagiannya  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

d. Mesosom

Pada tempat tertentu membran plasma melekok ke dalam membentuk organel yang disebut mesosom.

e. Ribosom

Ribosom merupakan organel tempat berlangsungnya sintesis protein. Ukurannya sangat kecil, berdiameter antara 15-20 nm (1 nanometer =  $10^{-8}$  meter).

f. DNA

Asam dioksiribonukleat (dioksiribonukleatic acid disingkat DNA) merupakan persenyawaan yang tersusun atas gula deoksiribosa, fosfat dan basa-basa nitrogen DNA berfungsi sebagai sifat pembawa genetik.

g. Flagella

Flagella merupakan benang cambuk yang berfungsi untuk bergerak. Jumlah dan bentuk flagella bervariasi pada setiap sel.



## 2. Struktur Sel Eukariotik

Perbedaan pokok antara sel prokariotik dengan sel eukariotik adalah sel eukariotik memiliki membran inti sedangkan sel prokariotik tidak. Selain itu sel eukariotik memiliki sistem endomembran yakni memiliki organel-organel bermembran seperti retikulum endoplasma, kompleks golgi, mitokondria dan lisosom. Sel eukariotik juga memiliki sentriol, sedangkan sel prokariotik tidak. **Struktur sel eukariotik meliputi:**

### a. Membran plasma

Membran plasma atau membran sel tersusun atas molekul lemak dan protein. Molekul lemak tersusun atas dua lapis yang terdapat dibagian tengah membran. Di sebelah luarnya terdapat lapisan protein perifer (protein tepi) yang menyusun tepi luar dan dalam. Protein yang masuk ke lapisan lemak itu disebut protein integral.

**Fungsi membran plasama adalah sebagai berikut:**

1. Melindungi isi sel
2. Mengatur keluar masuknya molekul-molekul
3. Sebagai reseptor (penerima) rangsangan dari luar sel

### b. Sitoplasma

Sitoplasma artinya plasma sel yakni cairan yang berada dalam sel selain nukleoplasma (plasma inti). Sitoplasma tersusun atas cairan atau padatan. Cairan sitoplasma disebut sitosol.

#### 1. Sifat-sifat fisik sitosol

Sifat fisik sitosol berubah karena mengandung protein

2. Fungsi sitoplasma

Fungsi sitoplasma sebagai tempat penyimpanan bahan-bahan kimia yang paling penting bagi metabolisme sel, seperti enzim-enzim, ion-ion, gula, lemak dan protein.

c. Nukleus

Nukleus atau inti sel merupakan organel terbesar yang berada dalam sel. Nukleus terdiri dari membran nukleus, nukleoplasma, nukleolus. Fungsi nukleus antara lain mengendalikan pembelahan sel, mengatur pembelahan sel, dan pembawa informasi genetik.

d. Sentriol

Sentriol merupakan organel yang dapat dilihat ketika sel mengadakan pembelahan. Sentriol hanya dijumpai pada sel hewan, sedangkan pada sel tumbuhan tidak.

e. Retikulum Endoplasma (R.E)

Retikulum berasal dari kata retikulas berarti anyaman benang/jala. Retikulum endoplasma berupa R.E kasar dan R.E halus. Fungsi Retikulum Endoplasma kasar yaitu menampung protein yang disintesis oleh ribosom untuk disalurkan ke kompleks golgi dan akhirnya dikeluarkan dari sel. R.E kasar dan R.E. halus mensintesis lemak dan kolesterol, menetralkan racun (detoksifikasi) misalnya yang ada di dalam sel-sel hati, transporasi molekul-molekul dari bagian sel yang satu ke bagian sel yang lain.

f. Ribosom

Ribosom tersusun atas RNA – ribosom (RNA-r) dan protein.

g. Kompleks golgi

Kompleks golgi sering disebut golgi saja, pada sel tumbuhan, kompleks golgi disebut diktiosom.

h. Lisosom

Lisosom (lyxo = pencernaan, som = tubuh) merupakan membran berbentuk kantong kecil yang berisi enzim hidrolitik yang disebut lisosom.

i. Badan mikro

Badan mikro yaitu peroksisom dan glioksisom.

j. Mitokondria

Mitokondria merupakan penghasil energi karena berfungsi untuk respirasi. Mitokondria memiliki 2 membran, yaitu membran luar dan membran dalam.

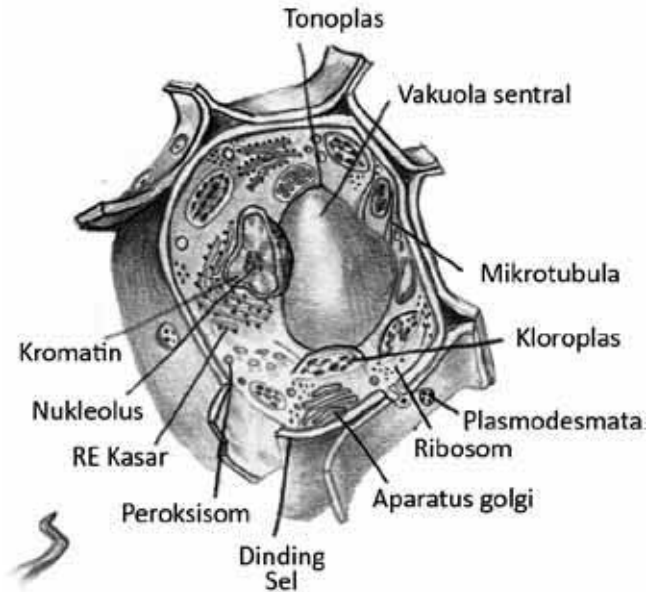
k. Mikrotubulus dan mikrofilamen

Mikrotubulus pada sel yaitu berupa benang-benang spindel yang menghubungkan dua kutub sel pada waktu sel membelah, pada sel protozoa, misalnya *Amoeba*, Mikrofilamen berperan dalam pembentukan pseudopodia gerakan sel dan gerakan sitoplasma.

### 3. Perbedaan Sel Tumbuhan Dan Sel Hewan

a. Sel Tumbuhan

Berikut adalah bagian dari sel yang khas dimiliki oleh sel tumbuhan (gambar 1.3).



**Gambar 1.3** Sel Tumbuhan dengan bagian-bagiannya  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

1. Dinding sel

Di sebelah luar membran plasma terdapat dinding sel yang kaku, dibentuk oleh kompleks golgi. Dinding sel berperan dalam turgiditas sel. Pada dinding sel yang bertetangga di antara dinding selnya terdapat lamela tengah yang banyak mengandung kalsium dan magnesium.

2. Plastida

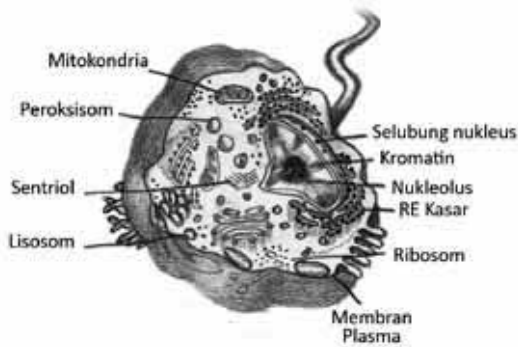
Macam-macam plastida

- a. Kromoplas adalah plastida yang mengandung pigmen merah. Kromoplas terdapat antara lain pada buah tomat yang berwarna merah.

- b. Leukoplas adalah plastida yang tidak mengandung pigmen warna. Plastida terdapat pada sel-sel embrional empulur batang.
  - c. Amiloplas adalah plastida yang mengandung amilum
  - d. Kloroplas adalah plastida yang mengandung klorofil
3. Vakuola sel, pada tumbuhan bersifat menetap. Sel-sel tumbuhan yang memiliki vakuola besar biasa adalah sel-sel parenkim dan kolenkim. Fungsi vakuola yaitu tempat cadangan makanan, menyimpan pigmen, menyimpan minyak atsiri dan menyimpan sisa metabolisme.

b. Sel Hewan

Dalam satu sel hewan (gambar 1.4), terdapat dua sentriol. Kedua sentriol itu terdapat dalam satu tempat yang disebut sentrosom. Saat pembelahan sel tiap-tiap sentriol memisahkan diri menuju kutub yang berlawanan dan memancarkan benang-benang gelendong pembelahan yang akan menjerat kromosom.



**Gambar 1.4**  
Sel Hewan  
(Bruce Albert,  
1994. Gambar  
ulang oleh Penulis)

Dengan demikian perbedaan sel tumbuhan dan sel hewan, antara lain :

### **Sel Hewan**

1. Tidak memiliki dinding sel
2. Tidak memiliki plastida
3. Memiliki lisosom
4. Memiliki sentrosom
5. Timbunan zat berupa lemak dan glikogen
6. Bentuk tidak tetap
7. Pada hewan tertentu memiliki vakuola, ukuran kecil, sedikit

### **Sel Tumbuhan**

1. Memiliki dinding sel dan membran sel
2. Umumnya memiliki plastida
3. Tidak memiliki lisosom
4. Tidak memiliki sentrosom
5. Timbunan zat berupa pati
6. Bentuk tetap
7. Memiliki vakuola ukuran besar dan banyak

## **D. Bagaimana Mempelajari Sel**

Sel itu sangat kecil tetapi kompleks. Sulit bagi kita untuk melihat strukturnya, lebih sulit lagi bila kita ingin menyingkapkan bagaimana berbagai komponennya berfungsi. Yang dapat kita pelajari dari sel ini bergantung pada peralatan yang tersedia. Oleh karena itu, untuk

memahami biologi sel masa kini, kita perlu mengetahui sedikit tentang metode-metode yang dipakai.

Sel dahulu dimulai dengan bantuan mikroskop cahaya, alat ini masih tetap penting, kendatipun alat-alat pencitraan yang lebih baru telah ditemukan, yang menggunakan berkas elektron maupun yang menggunakan bentuk radiasi lain.

## 1. Mikroskop Cahaya

Sel hewan umumnya mempunyai diameter 10 hingga 20 mikrometer. Oleh karena itu, baru setelah mikroskop cahaya yang baik tersedia, pada awal abad ke-19, orang mengetahui bahwa semua jaringan pada tumbuhan dan hewan ternyata tersusun dari bagian-bagian lebih kecil yang disebut sel. Penemuan oleh Schleiden dan Schwann dalam tahun 1838 yang dikenal sebagai doktrin sel, secara resmi menandai lahirnya cabang ilmu biologi sel.

Selain kecil, sel hewan juga tidak berwarna dan akibatnya, para peneliti baru dapat mengenali ciri-ciri utama di sebelah dalamnya sesudah berhasil dikembangkannya berbagai bahan pewarna yang dapat menimbulkan kontras secukupnya pada bagian-bagian sel. Demikian pula, diciptakannya mikroskop elektron yang perbesarannya jauh lebih kuat pada awal tahun 1940-an memerlukan pengembangan teknik-teknik baru untuk pengawetan dan pewarnaan sel sebelum orang mulai dapat menyaksikan kompleksitas sepenuhnya. Beberapa peristiwa penting sehubungan dengan perkembangan mikroskop cahaya diringkaskan sebagai berikut:

Beberapa penemuan penting dalam sejarah mikroskop cahaya.

- 1611 **Kepler** mengemukakan gagasan tentang pembuatan mikroskop majemuk (*compound microscope*).
- 1655 **Hooke** menggunakan sebuah mikroskop majemuk untuk mengungkapkan adanya pori-pori kecil dalam sayatan-sayatan gabus yang disebutnya “sel”.
- 1674 **Leeuwenhoek** melaporkan penemuannya atas protozoa. Ia pertama kali melihat bakteri sembilan tahun kemudian.
- 1833 **Brown** menerbitkan pengamatan mikroskopiknya terhadap anggrek. Di situ ia menjelaskan inti (nukleus) sel dengan jelas.
- 1838 **Schleiden** dan **Schwann** mengemukakan teori tentang sel, yang menyatakan bahwa sel yang mempunyai nukleus itu menentukan struktur dan fungsi bagian-bagian dalam tumbuhan dan hewan.
- 1857 **Kolliker** menjelaskan mitokondria dalam sel-sel otot.
- 1876 **Abbe** menganalisis efek difraksi pada pembentukan citra dalam mikroskop dan mengusulkan cara untuk menyempurnakan rancangan mikroskop.
- 1879 **Flemming** menerangkan dengan jelas sekali perilaku kromosom selama proses mitosis dalam sel-sel hewan.
- 1881 **Retzius** menerangkan berbagai jaringan tubuh hewan dengan kerincian yang belum pernah tertandingi oleh peneliti lain yang menggunakan mikroskop cahaya. Dalam dua dasawarsa berikutnya, ia, **Cajal**, dan pakar-pakar histologi lain mengembangkan



metode pewarnaan (*staining*) dan meletakkan dasar-dasar yang penting dalam mempelajari anatomi dengan mikroskop.

- 1882 Koch** menggunakan zat pewarna anilin untuk mewarnai mikroorganisme dan mengidentifikasi bakteri-bakteri yang menyebabkan tuberkulosis dan kolera. Dalam dua dasawarsa berikutnya, pakar-pakar bakteriologi lain, seperti **Klebs** dan **Pasteur**, berhasil mengenali agen-agen penyebab berbagai penyakit lain melalui pengamatan mikroskop terhadap sediaan-sediaan yang telah diwarnai.
- 1886 Zeiss** membuat perpaduan lensa, menurut rancangan **Abbe**, yang memungkinkan peneliti menguraikan struktur sampai batas yang dimungkinkan oleh sifat alami cahaya nampak.
- 1898 Golgi** pertama kali melihat dan menerangkan perangkat Golgi berkat pewarna sel dengan perak nitrat.
- 1924 Lascassagne** dan rekan-rekannya mengembangkan metode otoradiografi pertama untuk melokalisasikan polonium yang radioaktif dalam spesimen-spesimen biologi.
- 1930 Lebedeff** merancang dan membuat mikroskop interferensi pertama. Pada tahun 1932, **Zernicke** menciptakan mikroskop *phase-contrast*. Kedua pengembangan ini memungkinkan sel hidup yang tidak diwarnai diamati secara rinci untuk pertama kalinya.
- 1941 Coons** menggunakan antibodi yang dikombinasikan dengan zat pewarna berpendar untuk mendeteksi antigen dalam sel.

- 1952 Nomarski** menciptakan dan mematenkan sistem kontras interferensi diferensial untuk mikroskop cahaya rancangannya.
- 1981 Allen dan Inoue** menyempurnakan kontras video pada mikroskop cahaya.

Objek paling kecil yang dapat dilihat dengan jelas oleh mikroskop cahaya ditentukan oleh panjang gelombang cahaya nampak, yang memiliki rentang dari sekitar 0,4 mikrometer (untuk warna ungu) hingga 0,7 mikrometer (untuk merah tua). Dalam pengertian praktis, bakteri dan mitokondria, yang memiliki lebar kira-kira 500 nm (0,5  $\mu\text{m}$ ).

Untuk membuat sebuah sediaan permanen yang dapat diwarnai dan diamati dengan santai dalam mikroskop, mula-mula kita harus memberi suatu perlakuan tertentu kepada sel untuk membuatnya tidak bergerak, mematikan, kemudian mengawetkannya. Perlakuan ini biasa disebut *fiksasi*. Biasanya sampel jaringan terlalu tebal apabila kita hendak langsung mengamati salah satu selnya pada resolusi yang tinggi. Oleh karena itu, sesudah proses fiksasi biasanya jaringan dipotong-potong menjadi sayatan-sayatan yang sangat tipis dengan sebuah *mikrotom*, yaitu mesin berpisau tajam yang cara kerjanya seperti mesin pengeras daging.

## 2. Mikroskop Kontras Fase

Mikroskop ini digunakan untuk pengamatan selama sel-sel dalam keadaan hidup, tanpa fiksasi atau pembekuan. Untuk maksud ini, mikroskop harus dilengkapi dengan sistem optik khusus. Apabila cahaya menembus sebuah sel hidup,

fase gelombang cahaya tersebut berubah sesuai dengan indeks bias sel; cahaya yang melewati bagian sel yang relatif tebal atau padat, misalnya nukleus, akan mengalami perlambatan dan sebagai akibat fasenya bergeser relatif terhadap cahaya yang telah menembus bagian sitoplasma yang lebih tipis. Baik **mikroskop kontras-fase** maupun **mikroskop kontras-interferensi diferensial** bekerja dengan cara mengeksploitasi efek yang timbul dari gelombang. Kedua jenis mikroskop cahaya ini digunakan secara luas untuk visualisasi sel-sel hidup.

Salah satu keuntungan besar dari mikroskop kontras-fase, mikroskop interferensi, dan mikroskop medan-gelap adalah bahwa semua itu memungkinkan kita mengamati gerak-gerak yang terjadi, misalnya dalam proses mitosis atau migrasi sel. Karena banyak gerak sel yang terlalu lambat untuk diamati secara normal maka orang sering merekam gerak tersebut dengan pemotretan berkala, dengan kamera vide. Gambar-gambar berurutan yang dibuat dengan waktu jeda secukupnya, bila diputar ulang akan menghasilkan rekaman kejadian yang tampaknya berlangsung sangat cepat.

### 3. Mikroskop Elektron

Mikroskop elektron merupakan salah satu alternatif alat untuk mengamati struktur sel dari obyek-obyek biologi (mulai dari sel-sel, biokimia dan genetika molekuler hingga sel-sel morphologis). Mikroskop elektron merupakan alat yang dapat memvisualisasikan sel dalam bentuk tampilan gambar elektron. Dengan demikian, untuk memahami prinsip kerja mikroskop elektron, terlebih dahulu kita harus

mempunyai gambaran mengenai konsep-konsep struktur dan fungsi sel.

**Mikroskop elektron transmisi** (transmission electron microscopy/ **TEM**) mirip dengan mikroskop cahaya, walaupun TEM jauh lebih besar dan terbalik (Gambar 1.5). Elektron dalam mikroskop ini dipancarkan oleh sebuah filamen atau katoda di bagian atas sebuah kolom silinder yang tingginya sekitar dua meter. Karena elektron bisa terpecah akibat benturan dengan molekul-molekul udara, udara harus dipompa ke luar dahulu dari kolom tersebut hingga mencapai keadaan vakum.

Persitiwa-Peristiwa Penting dalam Pengembangan Mikroskop Elektron dan Penerapannya pada Biologi Sel.

- 1897 J.J. Thomson** mengumumkan adanya partikel bermuatan negatif, yang kemudian disebut *elektron*.
- 1924 de Broglie** menyatakan bahwa elektron yang bergerak mempunyai sifat seperti gelombang.
- 1926 Busch** membuktikan bahwa berkas pancaran elektron dapat difokuskan dengan menggunakan sebuah lensa magnetik berbentuk silinder. Ini mengawali berkembangnya optika elektron.
- 1931 Ruska** dan rekan-rekannya membuat mikroskop elektron transmisi pertama.
- 1935 Knoll** menunjukkan kelayakan rancangan mikroskop elektron pengulasan; tiga tahun kemudian prototip instrumen tersebut berhasil dibuat oleh **Von Ardenne**.
- 1939 Siemens** memproduksi mikroskop elektron transmisi komersialnya yang pertama.

- 1944 Williams dan Wyckoff** memperkenalkan teknik *metal shadowing*.
- 1945 Porter, Claude dan Fullam** menggunakan mikroskop elektron untuk mengamati sel dalam kultur jaringan sesudah difiksasi dan “diwarnai” dengan  $O_5O_4$ .
- 1948 Pease dan Baker** dengan meyakinkan menyiapkan sayatan-sayatan material biologi yang tipis sekali (0,1 hingga 0,2 mikrometer).
- 1952 Palade, Porter, dan Sjostrand** mengembangkan metode-metode fiksasi dan penyayatan tipis yang memungkinkan berbagai struktur sebelah dalam sel dapat dilihat untuk pertama kalinya. Dalam salah satu penerapan pertama teknik ini, **H.E. Huxley** menunjukkan bahwa otot rangka tersusun dari filamen-filamen protein yang bertumpuk-tumpuk. Ini membuktikan hipotesis tentang *sliding filament* untuk mekanisme kontraksi otot.
- 1953 Porter dan Blum** mengembangkan ultramikrotom pertama yang segera diterima secara luas, antara lain berdasarkan teknik-teknik yang telah diperkenalkan oleh **Claude dan Sjostrand**.
- 1956 Glauert dan rekan-rekannya** menunjukkan bahwa resin epoksi *Araldite* adalah bahan penguat yang efektif sekali untuk mikroskopi elektron. **Luft** memperkenalkan resin penguat lain, *Epon*, lima tahun kemudian.
- 1957 Robertson** menerangkan struktur rangkap tiga yang terdapat pada membran sel, yang untuk pertama kalinya dilihat dengan mikroskop elektron.

- 1957** Teknik *freeze-fracture*, yang mula-mula dikembangkan oleh **Steere**, disempurnakan oleh **Moor** dan **Muhlethaler**. Lama kemudian (1966), **Branton** menunjukkan bahwa teknik *freeze-fracture* memungkinkan pengamatan terhadap bagian dalam membran.
- 1959** **Singer** menggunakan antibodi yang digandengkan dengan feritin untuk mendeteksi molekul-molekul sel dengan mikroskop elektron.
- 1959** **Brener** dan **Horne** mengembangkan teknik pewarnaan negatif, yang ditemukan empat tahun sebelumnya oleh **Hall**, menjadi teknik yang bermanfaat untuk mengamati virus, bakteri, dan filamen protein.
- 1963** **Sabatini**, **Bensch**, dan **Barnett** memperkenalkan glutaraldehida (biasanya dilanjutkan dengan  $O_5O_4$ ) sebagai fiksatif untuk mikroskopi elektron.
- 1965** **Cambridge Instruments** memproduksi mikroskop elektron pengulasan komersialnya yang pertama.
- 1968** **de Rosier** dan **Klug** menerangkan teknik untuk merekonstruksi struktur tiga dimensi dari mikrograf elektron.
- 1975** **Henderson** dan **Unwin** untuk pertama kalinya menentukan struktur sebuah protein membran melalui rekonstruksi komputer dari mikrograf-mikrograf elektron atas sampel yang tidak diwarnai.
- 1979** **Heuser**, **Reese**, dan para mitrakerjanya mengembangkan sebuah teknik pengsketsaan dalam yang tinggi resolusinya berlandaskan pada metode pembekuan sangat cepat.

## 5. Pertanyaan Diskusi

- 1) Apakah perbedaan antara Sel Prokariotik dan Eukariotik dan berikan satu contoh masing-masing?
- 2) Gambarkan dan sebutkan bagian-bagian pada Sel Prokariotik!
- 3) Jelaskan ciri khas pada sel tumbuhan!
- 4) Bagaimana perbandingan antara sel hewan dan sel tumbuhan?
- 5) Jelaskan bagian-bagian mikroskop!



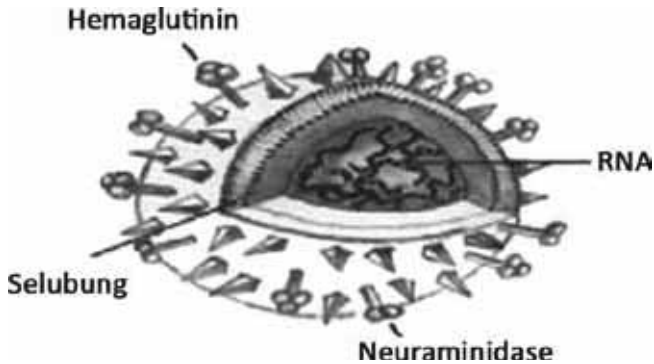
## Bab II

# Virus

### A. Struktur Virus

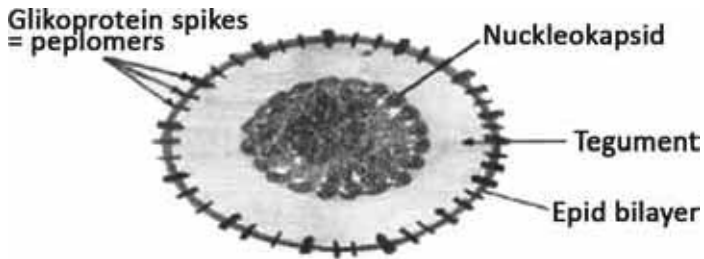
Virus adalah partikel kecil (100-300 angstrom) terdiri atas protein dan asam nukleat (DNA atau RNA) serta dapat menimbulkan infeksi pada sel prokariotik maupun sel eukariotik. Pada dasarnya virus hanya terdiri atas dua komponen, yaitu asam nukleat (DNA atau RNA) yang terdapat pada bagian inti (*core*) dan protein pembungkusnya (kapsid). Struktur kulit/pembungkus virus berisi molekul protein sederhana (satu jenis) sampai partikel yang lebih kompleks. Kulit (pembungkus) virus dibangun oleh lebih kurang lima belas macam protein yang berbeda. Beberapa virus yang menyerang (menginfeksi) sel hewan misalnya virus influenza (gambar 2.1) dan virus herpes (gambar 2.2) dikelilingi oleh membran luar yang berasal dari membran plasma sel inangnya (*host cell*).





**Gambar 2.1** Virus Influenza dan bagian-bagiannya  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

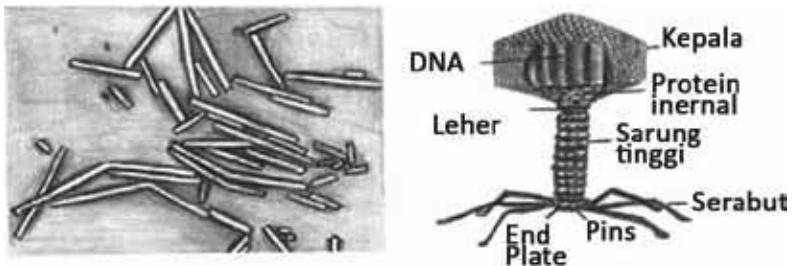
Molekul-molekul asam nukleat dari partikel virus mungkin berbentuk linear atau melingkar. Virus yang menyerang sel tumbuhan biasanya berisi molekul RNA linear dan virus yang menyerang sel hewan dan bakteri salah satunya mungkin berisi DNA atau RNA dalam bentuk linear atau melingkar. Asam nukleat molekul-molekul inti virus jarak dari rantai pendek DNA atau RNA-nya tidak sama, dengan beberapa ribu nukleotida, berisi sedikitnya 15-20 gen. Pada rantai panjang sama banyak dengan 250.000 nukleotida dan 500 gen, sebagian besar gen-gen kode molekul asam nukleat “viral” memerlukan enzim untuk replikasi DNA atau RNA pada bagian pusat virus atau untuk protein pembungkus.



**Gambar 2.2 Virus**

(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Sebagian besar virus mempunyai pembungkus protein (kapsid) berbentuk heliks atau filamen. Kapsid di buat dari sub-sub unit protein (kapsomer) membentuk spiral atau heliks yang mengelilingi asam nukleat pada bagian pusat virus. Kebanyakan virus yang menyebabkan penyakit pada tumbuhan mempunyai tipe heliks, seperti pada gambar 2.3.

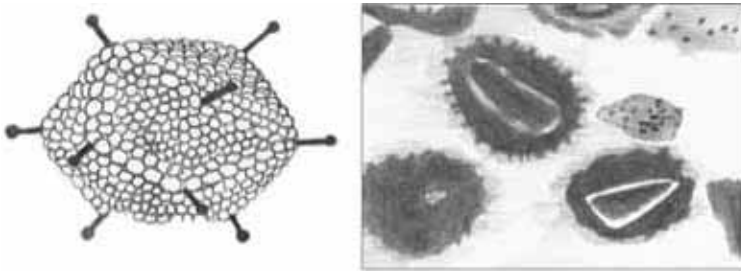


**Gambar 2.3**

a. Tipe heliks virus      b. Bakteriophage dan bagian-bagiannya  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Virus-virus lain yang mempunyai kapsid polihedral berbentuk seperti polihedron sehingga memberi kesan

seperti kristal. Kapsid (polihedral) dibentuk dari bidang sisi yang banyak menyerupai bidang geodesi. Kapsid dari kebanyakan virus ini berbentuk ikosahedron (icosahedron) yaitu polihedron beraturan dengan 20 bidang segitiga, 30 tipe (pinggir), dan 12 sudut. Diantaranya bidang ikosahedron dan virus polihedral disusun oleh sejumlah kapsomer protein (gambar 2.4).

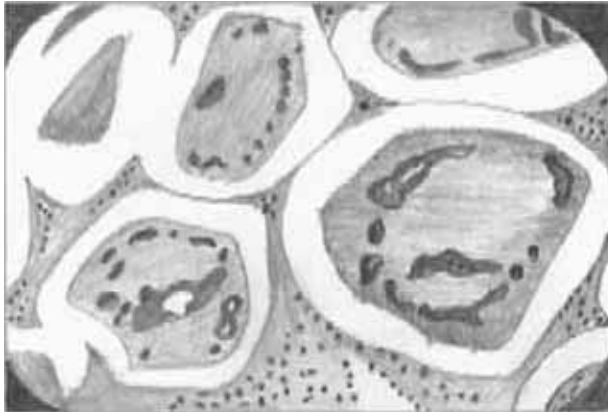


**Gambar 2.4**

Virus Polihedral sedang membentuk Icosahedron  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Ekor pada phage tersebut sangat kompleks karena terdiri atas: leher (*collar*), selubung (*sheath*) dan lempeng dasar. Pada lempeng dasar terdapat enam buah serabut ekor yang panjang, berfungsi untuk memasukkan asam nukleat ke dalam sel bakteri yang diserangnya.

Virus dengan membran (*envelopes*) seperti halnya penyebab *lymphocystis* (gambar 2.5).



**Gambar 2.5** Sel yang diinfeksi oleh *Lymphocystis*  
(Dokumen Penulis)

## B. Serangan Virus Terhadap Bakteri

Infeksi oleh virus merupakan suatu proses yang berlangsung secara bertahap, walaupun waktunya singkat. Misalnya serangan bakteriofage T-genap kepada bakteri *Escherichia coli* dapat dirinci menjadi tahapan berikut:

1. Bakteri dan virus (phage) yang cukup jumlahnya, bersentuhan.
2. Serabut ekornya menempel pada dinding sel bakteri, untuk meletakkan phage pada tempat yang tepat; selanjutnya, tonjolan-tonjolan yang terdapat pada lempeng dasar melekatkan phage tersebut pada dinding sel bakteri.
3. Enzim lisozim yang terdapat pada phage mencerna sebagian dinding bakteri sehingga terbentuk lubang kecil.

4. Phage menyuntikan ADN melalui lubang tersebut. Setelah ADN phage masuk ke dalam sel bakteri, lalu disusul oleh penghancuran ADN bakteri. Dengan demikian, yang ada di dalam bakteri hanyalah ADN virus.
5. ADN virus membuat ARN virus untuk menyusun protein virus dengan menggunakan ribosom bakteri dan sumber energi (ATP) yang ada pada bakteri tersebut.
6. Protein virus yang terbentuk, membungkus ADN-nya, yang juga telah banyak terbentuk sebagai hasil replikasi. Dengan demikian, terbentuklah partikel-partikel phage yang utuh.
7. Sel bakteri mengalami lisis, isinya keluar, sedangkan phage-phage yang terbentuk keluar dengan bebas. Dari satu phage yang meninjeksikan ADN ke dalam sel bakteri dapat dihasilkan “keturunan” sampai 200 partikel phage.

## C. Reproduksi Virus

### 1. Siklus Litik

Proses seperti yang diuraikan di atas, mulai dari serangan virus kepada bakteri sampai dengan hancurnya dinding bakteri (*lysis*) serta bebasnya partikel-partikel phage yang terbentuk di dalamnya, dinamakan Siklus litik (*lytic cycle*). Pada suhu 37 derajat celsius, lamanya siklus sekitar 15 – 60 menit. Proses yang demikian, merupakan infeksi virulen, sedangkan virus yang bersangkutan dinamai virus

litik. Sel yang diserang oleh virus litik pasti mati dalam waktu yang singkat

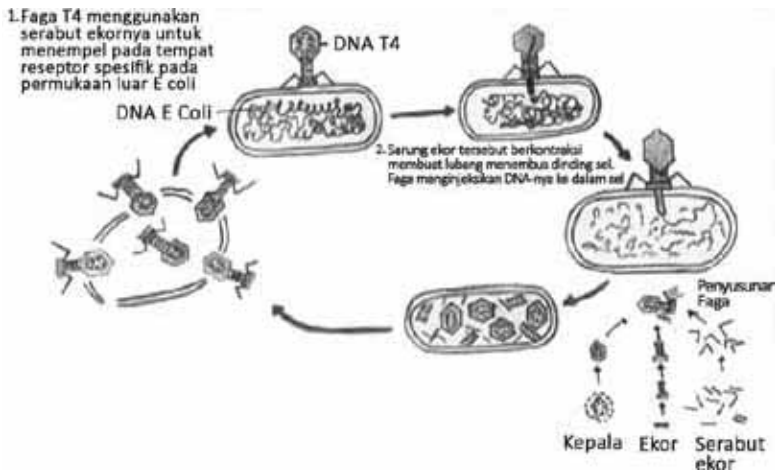
Siklus litik, secara umum mempunyai 3 tahap yaitu adsorpsi, penetrasi, replikasi (biosintesis, perakitan) dan lisis. Tahap-tahap Siklus Litik yaitu: adsorpsi, virus melekat dipermukaan sel inang. Penetrasi, virus mengeluarkan enzim yang dapat melubangi membran sel inang sehingga DNA/RNA dapat masuk. Biosintesis yaitu virus mengambil alih dan mengontrol kerja sel inang serta bereplikasi. Perakitan yaitu protein dan materi genetik yang telah digandakan dirakit menjadi virion. Lisis yaitu virion-virion yang telah lengkap keluar dari sel inang.

## 2. Siklus Lisogenik

Disamping phage litik, terdapat pula phage yang hanya menimbulkan infeksi “ringan” pada bakteri. Infeksi tersebut mengakibatkan lisis pada bakteri, tetapi dapat juga bersifat dorman. Dalam hal kedua, DNA phage melekat pada genom (DNA) bakteri sebagai *prophage* dan merupakan bagian dari material genetika pada bakteri tersebut. Bakteri yang mengandung DNA phage yang demikian dinamakan Bakteri Lisogenik sedangkan phage yang bersangkutan dinamai phage Lisogenik (gambar 2.6). Jika bakteri tersebut tidak mengalami lisis, tetapi terus membelah secara normal, maka prophage turut terbagikan kepada sel-sel anak. Salah satu contoh bakteri lisogenik adalah *Corynebacterium diphtheriae*. Bakteri tersebut hanya dapat membentuk toksin untuk menimbulkan penyakit difteri, jika di dalamnya terdapat phage tertentu yang mengandung DNA (gen) untuk membuat toksin.

Jika bakteri lisogenik mengalami lisis, maka phage-phage yang keluar membawa sebagian ADN bakteri. Phage yang demikian dapat menimbulkan rekombinasi genetik pada bakteri yang diserangnya. Pemindahan ADN suatu bakteri kepada bakteri lain dengan perantara phage sebagai sarana pengangkut, dinamai transduksi (membawa keseberang).

Pada daur lisogenik terdapat beberapa fase antara lain: Fase adsorpsi, pada fase ini terjadi pelekatan virus pada membran plasma bakteri. Fase penetrasi/injeksi yaitu fase pemasukan DNA/RNA virus pada bakteri. Fase penggabungan yaitu DNA/RNA virus bergabung dengan DNA dan RNA bakteri. Fase replikasi yaitu terjadi pembentukan kapsid/selubung protein virus. Setelah fase replikasi diatas berarti daur lisogenik telah selesai kemudian dilanjutkan ke fase-fase yang terdapat pada daur litik seperti fase perakitan kemudian pada fase ini terjadi perakitan phage-phage baru yang sudah sempurna berupa fase pembebasan. Pada fase pembebasan ini adalah fase lisisnya membran bakteri dan keluarnya phage-phage baru yang telah terbentuk ke udara.



**Gambar 2.6** Reproduksi virus (Litik dan Lisogenik)  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Siklus infeksi oleh virus tumbuhan dan virus hewan mengikuti pola yang mirip di atas. Kecuali pada mekanisme infeksi awal dalam beberapa kasus. Virus menginfeksi tumbuhan dan hewan memasuki sel-sel inangnya lengkap dengan kapsid pada sisi tubuh sel inang. Kapsid pecah bebas membebaskan asam nukleat pada inti (core) dan mulai/memprakarsai siklus infeksi sel.

Suatu unit virus yang utuh, yang belum masuk ke dalam sel yang hidup, dinamai virion. Virion dapat membersihkan dan mengkristalkan dan menyimpan untuk jangka waktu yang tak terbatas tanpa merubah atau merusak.



## D. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan bagian-bagian virus!
2. Bagaimana virus menyerang bakteri ?
3. Jelaskan perbedaan siklus litik dan lisogenik !
4. Mengapa virus bukan merupakan bagian organisme ?
5. Apakah penyakit yang disebabkan virus dapat disembuhkan ? jelaskan !



## Bab III

# Struktur dan Fungsi Membran Plasma (Plasmalemma)

## A. Pendahuluan

Tanpa membran plasma sebuah sel tidak akan mungkin melangsungkan kehidupannya. Membran plasma mempunyai sifat hidrofobik di bagian tengah dan hidrofilik di bagian permukaan luar. Membran plasma yang membungkus sebuah sel selain membatasi keberadaan sebuah sel juga memelihara perbedaan-perbedaan pokok antara isi sel dengan lingkungannya. Membran plasma tidak sekedar merupakan sebuah penyekat pasif melainkan juga sebuah filter yang mempunyai kemampuan memilih dan memilah-milah bahan-bahan yang melintasinya dengan tetap memelihara perbedaan kadar ion di luar dan dalam sel. Bahan-bahan yang dibutuhkan sel diperbolehkan memasuki sel sedangkan bahan-bahan yang merupakan limbah sel dapat dilintaskan ke luar sel.

## 1. Sejarah Perkembangan Model Membran Sel

- a. Robert Hooke (1635-1703)
- b. Charles Overton (1895) : Membran terdiri dari lipida.
- c. E. Gorter and G. Grendel (1925) : Membran merupakan dwi lapis fosfolipida (phospholipid bilayer).
- d. J.R. Danielli and H. Davson (1935) : Protein merupakan bagian dari membran dan mengajukan Sandwich Model.

Melalui penelitian fisikokimia yaitu dengan membandingkan tegangan permukaan terjadi antara tetes minyak pada ekstrak selaput plasma dan air.

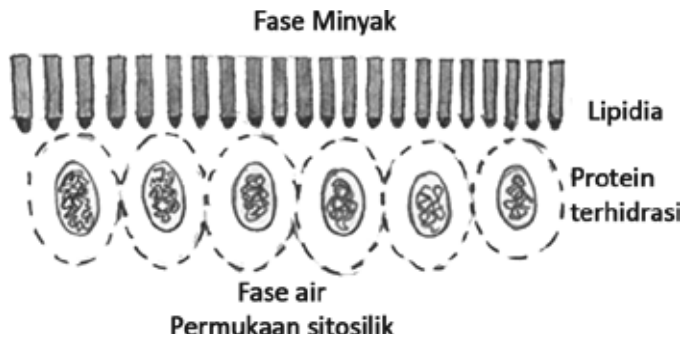
### 1) Model Danielli-Harvey (Trope 1984).

Model Danielli Harvey tentang struktur batas antara 2 fase.

Kelemahan :

Tidak ada ketebalan selaput yang jelas apabila selaput plasma mengalami hidrasi.

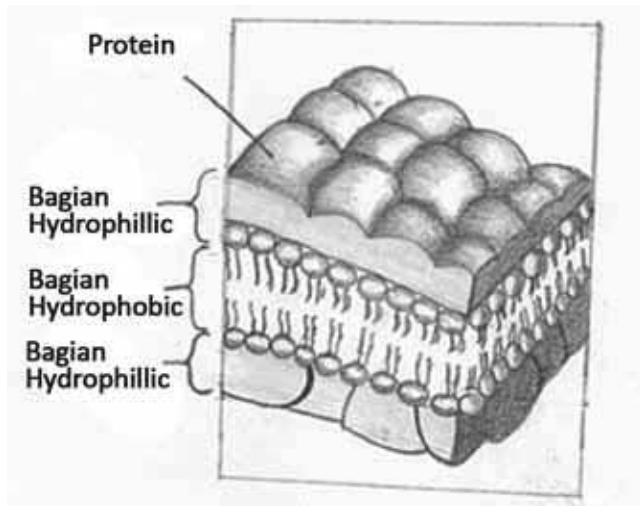
Sifat hidrofobik terutama disebabkan oleh komponen lipida senyawa protein dan karbohidrat memberikan sifat hidrofilik.



Gambar 3.1

Model membran sel menurut Danielli-Harvey (Thorpe,1984. Gambar ulang oleh Penulis).

2).

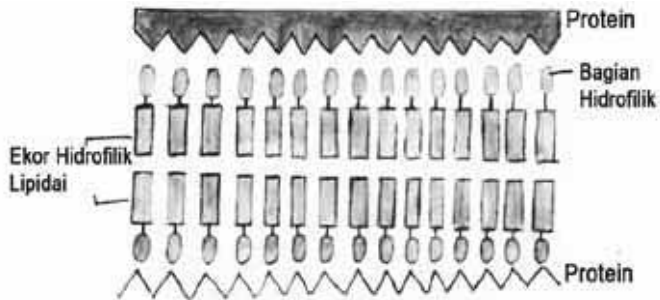


Gambar 3.2 Model Danielli-Davson dwi lapis lipid yang diapit secara "Sandwicheh" molekul protein globular

(Thorpe,1984. Gambar ulang oleh Penulis)

- e. J.D. Robertson (1950) ; Membran.

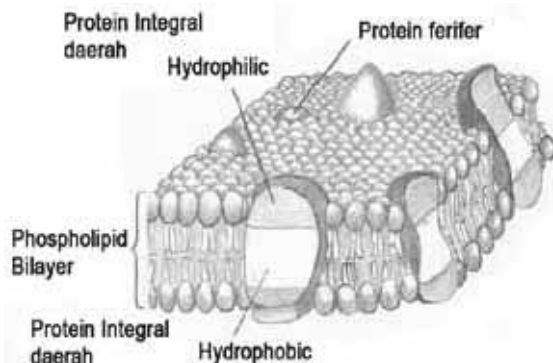
Jenis protein kedua permukaan tidak sama sedangkan bagian lipida digambarkan sebagai dwi lapis. Dengan model ini dapat diduga bahwa lapisan lipid mempunyai ketebalan 3,5 nm dan ketebalan molekul protein 2,0 nm. Jadi model ini dapat menjelaskan ketebalan selaput plasma mencapai 7,5 nm.



**Gambar 3.3**

Model membran menurut J.D. Robertson  
(Thorpe,1984. Gambar ulang oleh Penulis)

- f. S.J. Singer and G.L. Nicolson (1972) : Mengajukan Fluid Mosaik Model.



**Gambar 3.4**

Model membran menurut S.J. Singer and G.L. Nicolson, 1972  
(Gambar ulang oleh Penulis)

## 2. Membran Tersusun dari Fosfolipida

- a. Model membran telah lama di kembangkan sebelum para ilmuwan pertama kali mengamatinya dengan mikroskop elektron (sekitar 1950-an).
- b. Irving Langmuir (1917): model membran *membrane by dissolving fosfolipida dalam benzene* dan ketika benzena mengalami evaporasi, Kepala fosfolipida menyentuh air dan ekor ada di udara

## 3. Dwilapis Membran Sel

Menurut E. Gorter and F. Grendel (1925) :

- a. Jika Sel Darah Merah dianalisis
  - Mencakup lapisan fosfolipida
  - Membran sel tersusun dari dwilapis fosfolipida
  - Memiliki dua lapisan molekul yang tebal
- b. Molekul bersifat dwilapis :
  - Bagian ekor, yaitu rantai asam lemak (hidrofobik) Nonpolar = terlindung dari air/ bagian dalam (tengah lipid bilayer)
  - Bagian kepala, yaitu kelompok fosfat (hidrofilik) Polar berinteraksi dengan air/mengarah ke bagian luar.

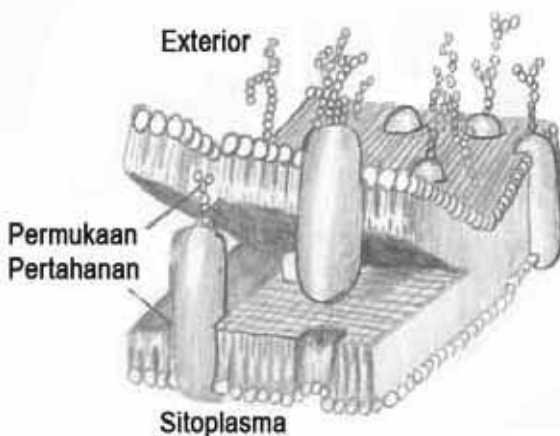
## 4. Model Terbaru S.J. Singer and G. Nicolson (1972)

Yaitu merevisi model membran sel, dan mengusulkan bahwa letak protein membran ada yang tersebar dan ada secara individu masuk ke dalam dwilapis fosfolipida.

- Model Mosaik Fluida (*Fluid Mosaic Model*)
- Wilayah Hidrofilik : protein dan fosfolipida maksimum berinteraksi dengan air
- Wilayah Hidrofobik : lingkungan tidak menyukai air

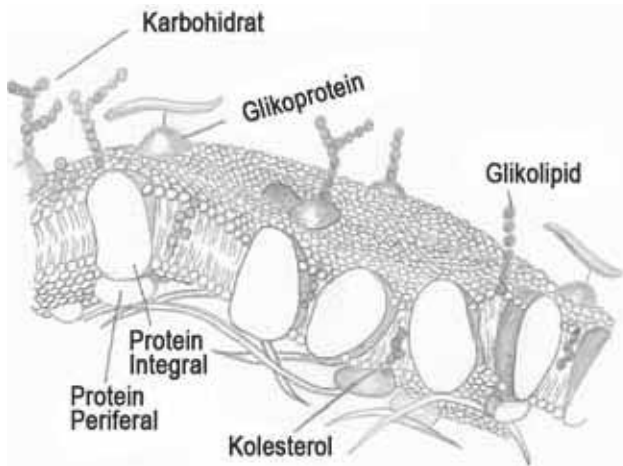
## B. Struktur Membran Plasma

Membran sel merupakan lapisan ganda (bilayer), terdiri dari lipid dan protein. Asam lemak (*Fatty acid*) bersifat hidrofobik dan fosfat bersifat hidrofilik. Menurut Singer & Nicholson (1972) bahwa membran sel memiliki model mosaik/‘fluid mozaic’ ditemukan dengan Teknik *Freeze Fractured*. Membran sel yaitu protein dan molekul lain yang tertanam dalam matrik fluida bilayer lipid. Fluid berarti fosfolipid dan protein dapat bergerak bebas dalam lapisan seakan-akan cairan. Mosaik yaitu pola yang dihasilkan oleh protein tersebar saat membran dilihat dari atas (gambar 3.5).



**Gambar 3.5**  
Teknik  
*Freeze*  
*Fractured*  
(Bruce  
Albert, 1994.  
Gambar  
ulang oleh  
Penulis)

Lipid bilayer kerangka struktur membran berfungsi sebagai penghalang ('barrier') yang membatasi pergerakan molekul secara acak, memiliki protein fungsi khusus. Karbohidrat berikatan dengan lipida/glikolipid atau protein/glikoprotein. (gambar 3.6).

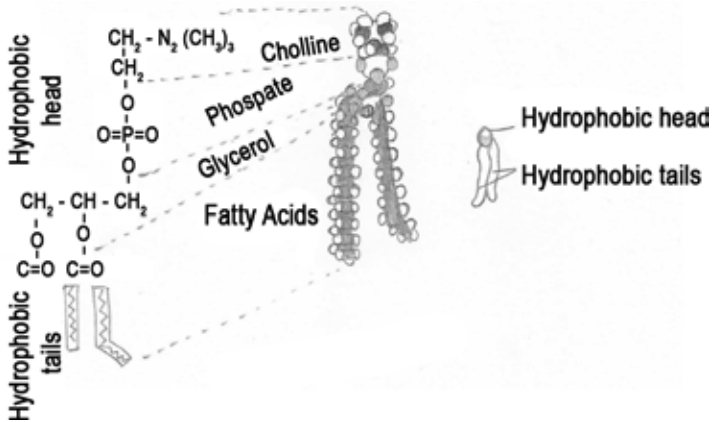


**Gambar 3.6** Susunan membran plasma  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Tipe lipida yaitu Fosfolipida, Sfingolipida, dan Kolesterol. Fosfolipida berupa fosfolipid (gambar 3.7) mengandung gugus fosfat, sfingolipida, dan kolesterol. Kolesterol banyak terdapat pada membran sel hewan kurang lebih 50% dari molekul lipid. Membran sel tumbuhan dan semua sel bakteri tidak banyak mengandung kolesterol, akan tetapi lebih sedikit dibandingkan lipida membran lainnya dan tidak terlalu bersifat amfipatik. Gugus hidroksil bersifat hidrofilik pada bagian



permukaan membran.



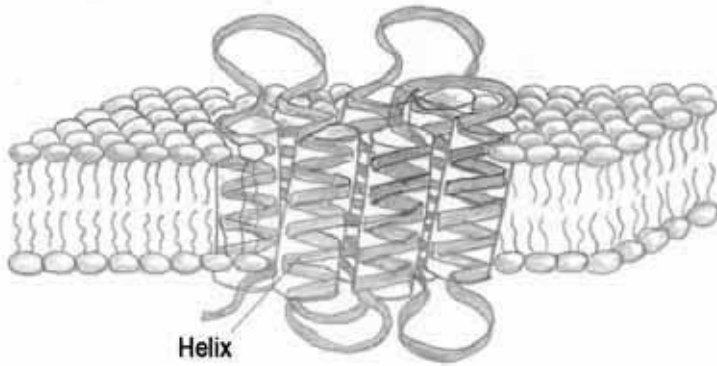
**Gambar 3.7** Fosfolipida

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## Protein Membran

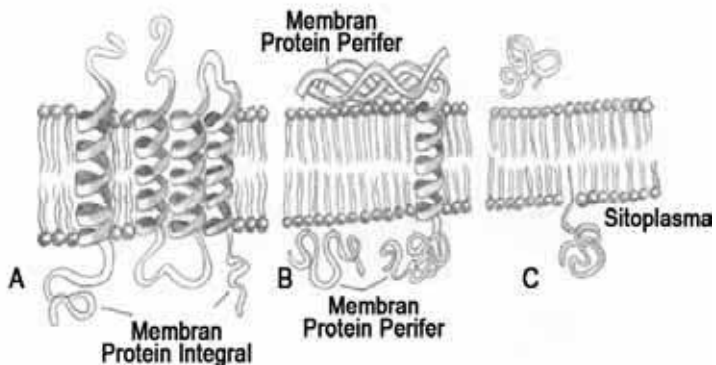
Membran sel dan membran organel memiliki susunan protein yang unik yaitu peripheral proteins, integral protein, dan protein yang berikatan dengan lipid.

- Peripheral proteins adalah protein yang terikat secara longgar pada permukaan membran, dapat merupakan *cell surface identity marker* (antigens).
- Integral proteins adalah protein yang berpenetrasi pada bilayer lipid merupakan transmembran protein, merupakan transpor protein sebagai channels dan pompa. Struktur protein transmembran memiliki model pita struktur sekunder  $\alpha$  heliks (gambar 3.8) bersifat hidrofobik, protein yang terletak hampir di dalam inti hidrofobik membran.



**Gambar 3.8** Struktur model pita struktur sekunder  $\alpha$  heliks protein transmembran  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

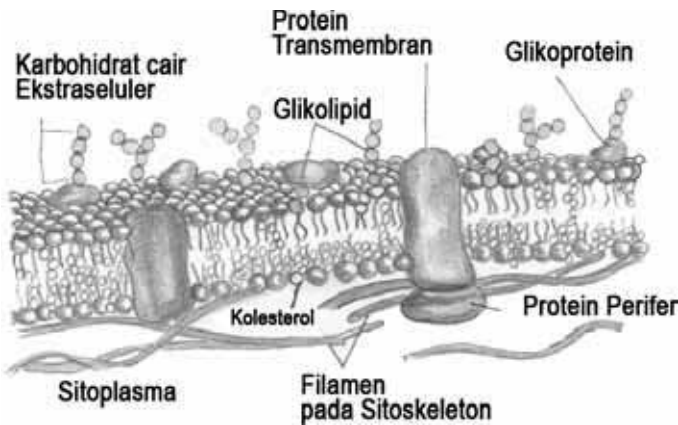
- c. Protein yang berikatan dengan lipid adalah protein yang berlokasi di luar membran lipid, pada bagian ekstraselular atau sitoplasmik. Berikut tiga jenis protein disajikan pada gambar 3.9.



**Gambar 3.9.** Tiga jenis protein membran sel  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

## Karbohidrat Membran

Pada membran terdapat karbohidrat berikatan secara kovalen pada lipid dan protein. Pada membran plasma terkandung 2 – 10% karbohidrat. Membran plasma sel darah merah manusia mengandung 52% protein, 40% lipid dan 8 % karbohidrat (gambar 3.10).



**Gambar 3.10** Membran karbohidrat  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## C. Fungsi Membran Sel

Membran sel berfungsi untuk membatasi sel dengan lingkungan fisik, menjamin berlangsungnya proses biokimia dan fisiologi, bersifat differensiasi permiabel (semipermiabel). Berdasarkan Teori Overton bahwa struktur dan sifat molekul-molekul penyusun pada membran sel

akan mencegah pertukaran molekul dari satu sisi ke bagian lainnya serta memungkinkan substansi tertentu masuk ke sitoplasma dari lingkungan luar, mencegah masuknya senyawa tertentu masuk ke sitoplasma.

## D. Transpor pada Membran Sel

Transpor pada membran sel terdiri dari:

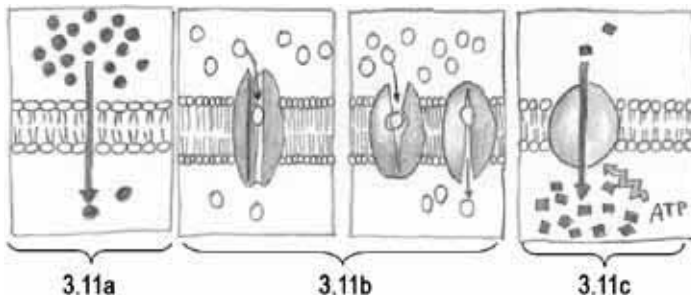
1. Transpor Pasif:

- Difusi sederhana melalui lipid bilayer (3.11a)
- Difusi sederhana melalui channel protein (3.11b)

2. Transpor Aktif:

- Pemanfaatan energi (ATP)

Berikut adalah gambar 3.11 dan 3.12 perbedaan transpor pasif dan aktif.



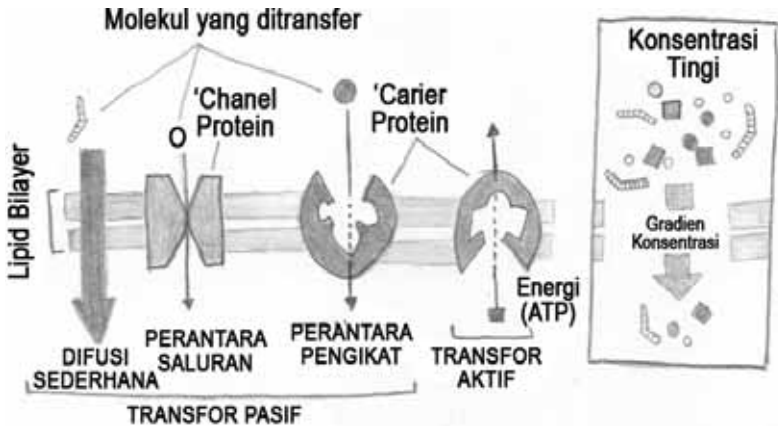
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Gambar dari kiri-kanan :

3.11a : Difusi sederhana

3.11b : Difusi sederhana melalui Channel Protein

3.11c : Transpor aktif

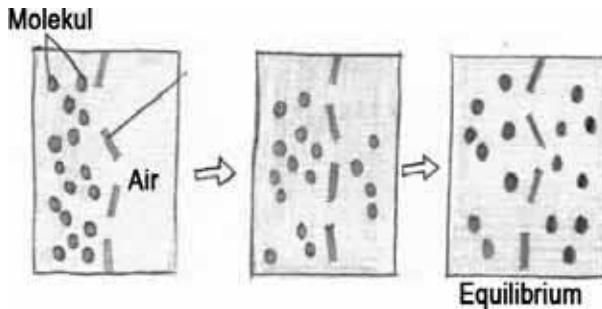


Gambar 3.12 Jenis transpor pada membran sel (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

### Difusi

Difusi adalah pergerakan senyawa dari daerah yang konsentrasi tinggi ke yang rendah, difusi terjadi melalui membran. Persyaratan yang harus dimiliki oleh suatu senyawa nonelektrolit agar dapat berdifusi secara pasif melalui membran, yaitu jika konsentrasi larutan pada satu sisi lebih besar sisi lain. Membran harus permeabel terhadap substansi tersebut, senyawa dapat melalui membran melalui pori aqueous. Gerakan pasif cenderung lambat dan berhenti saat konsentrasi di kedua tempat seimbang. Suatu zat akan berdifusi dari tempat yang lebih pekat ke tempat kurang pekat. Difusi adalah proses pasif, tidak ada energi untuk membuat molekul berpindah, memiliki energi kinetik alami

(gambar 3.13).



**Gambar 3.13** Difusi

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## Osmosis

Difusi suatu larutan melewati membran sel yang semipermeabel sehingga air bebas ke luar masuk membran dengan membatasi gerak zat terlarut dalam air. Air berdifusi dari hipotonik ke hipertonic (gambar 3.14).

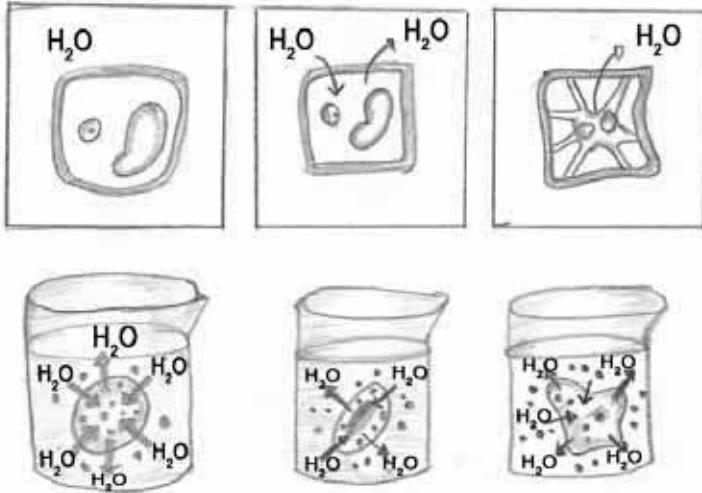


**Gambar 3.14**

Osmosis (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Larutan hipotonik yaitu konsentrasi zat terlarut lebih rendah dibandingkan konsentrasi zat pelarutnya tinggi

(encer). Larutan isotonik yaitu konsentrasi zat terlarut dan pelarut di dua daerah sudah sama. Larutan Hipertonik yaitu konsentrasi zat terlarut lebih tinggi dibandingkan konsentrasi zat pelarutnya rendah /pekat (gambar 3.15).



**Gambar 3.15** Perbandingan sel hewan dan sel tumbuhan pada larutan hipotonik, isotonik, dan hipertonik (Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

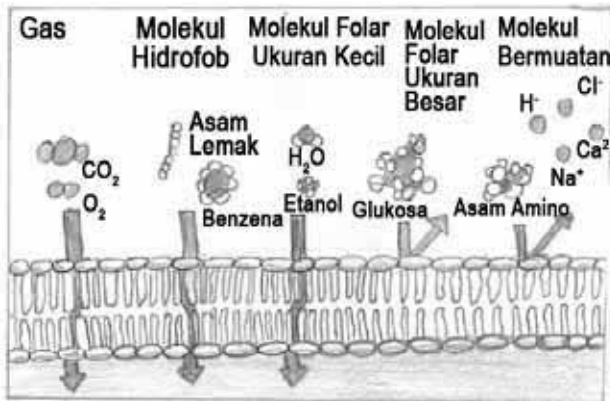
## Difusi Ion melalui Membran

Difusi ion melalui membran sangat impermeable terhadap senyawa yang bermuatan, termasuk ion kecil (gambar 3.16). Membran sel memiliki ion channel yang permeable untuk ion tertentu. Ion channel terbuka atau tertutup melalui 2 cara:

- Voltage-gated channels tergantung pada perbedaan muatan ion pada kedua sisi membran, contoh K-ion

channel

- b. Ligand-gated channels terjadi perubahan konformasi molekul dengan adanya molekul yang terikat pada channel ini, contoh asetilkolin.



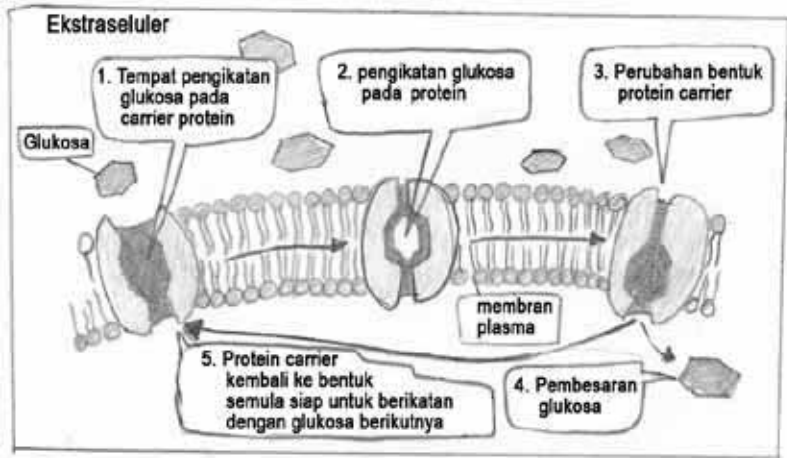
**Gambar 3.16.** Difusi ion melalui membran  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## Difusi Terfasilitasi

Difusi terfasilitasi adalah difusi yang bergerak dari daerah konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah. Senyawa berikatan dulu dengan *facilitative transporer* (protein carrier – protein integral membran) sebagai fasilitator difusi pada membran sel. Fasilitator difusi berupa senyawa yaitu asam amino, glukosa, molekul protein kecil. Difusi terfasilitasi yaitu molekul secara random berpindah melalui pori yang terbuka. Tidak membutuhkan energi (proses pasif). Molekul berpindah dari wilayah konsentrasi



tinggi ke wilayah kosentrasi rendah (gambar 3.17).

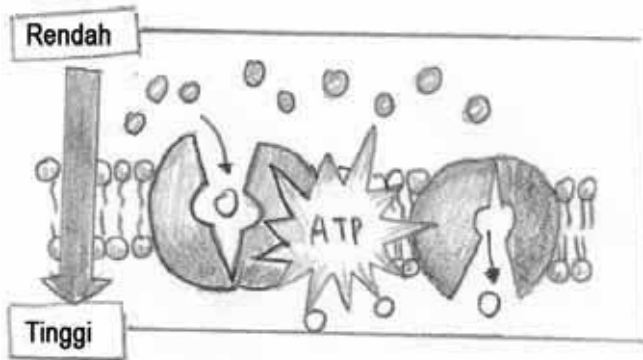


**Gambar 3.17.** Difusi terfasilitasi  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## Transpor Aktif

Transpor aktif membutuhkan energi dan melibatkan protein integral, pompa protein (gambar 3.18). Ada dua kelompok :

- Berkaitan dengan hidrolisa ATP ,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase (pompa Natrium kalium), pompa tipe-P,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase transpor Ca dari RE ke luar atau ke dalam RE,  $\text{H}^+/\text{K}^+$ -ATPase pada sel epitel, dalam saluran pencernaan.
- Co-transpor berkaitan dengan gradien ion, perpindahan glukosa berkaitan dengan ion Na – sel epitel. Sukrosa – ion  $\text{H}^+$  pada tumbuhan.

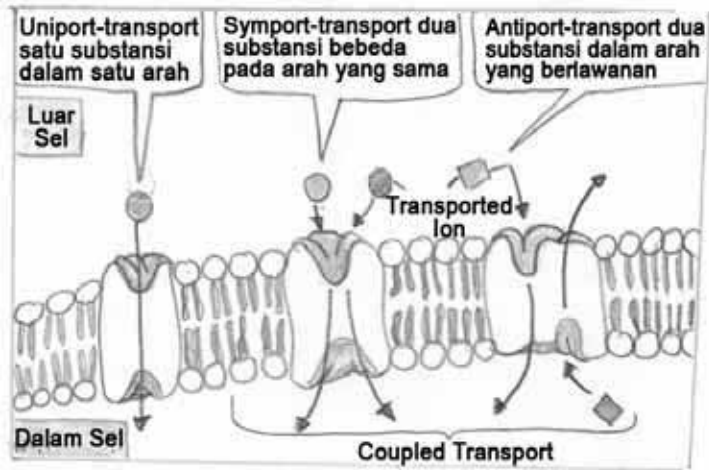


**Gambar 3.18.** Transpor aktif membutuhkan ATP  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Terdapat tiga protein transporter yang terlibat dalam transpor aktif, yaitu uniport, symport, dan antiports (gambar 3.19).

- a. *Uniport* adalah pergerakan ion tunggal dalam satu arah. Misalnya protein pengikat kalsium terdapat dalam membran plasma dan RE pada sel-sel yang aktif mentranspor ion  $\text{Ca}^{2+}$  dari daerah konsentrasi tinggi baik dari dalam maupun luar RE.
- b. *Symport* adalah pergerakan dua jenis ion dalam arah yang sama. Misalnya pengambilan asam amino dari usus halus ke sel-sel yang membatasinya memerlukan pengikatan ion  $\text{Na}^+$  dan asam amino secara bersamaan ke protein transporter yang sama.
- c. *Antiports* adalah pergerakan dua ion pada arah yang berlawanan. Satu ke luar dan yang lain ke dalam sel. Misalnya banyak sel yang memiliki pompa Na-K yang menggerakkan  $\text{Na}^+$  ke luar sel dan  $\text{K}^+$  ke dalam sel.

*Symport* dan *antiport* dikenal sebagai transporer berpasangan menggerakkan ion pada saat yang bersamaan.

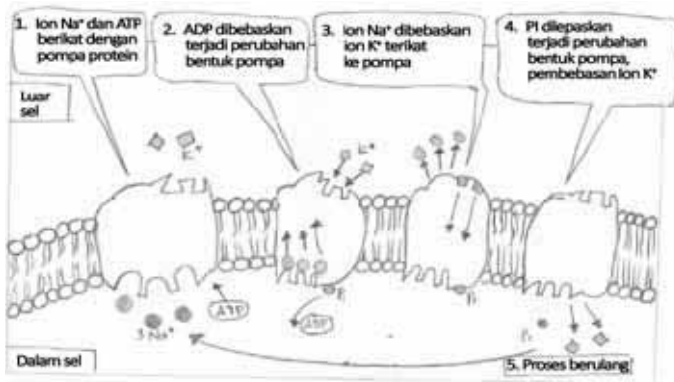


**Gambar 3.19.** Tiga protein transpor  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Proses transpor aktif ada transpor aktif primer; pompa Na-K dan transpor aktif sekunder:

a. **Transpor Aktif Primer**

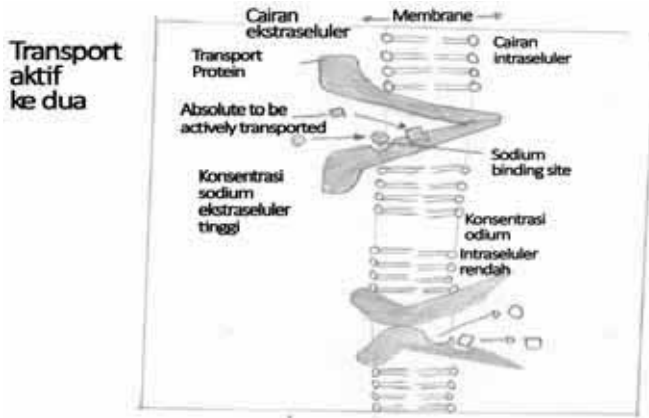
Pada transpor aktif memerlukan ATP yang kaya energi, memindahkan ion melawan gradien konsentrasi. Untuk setiap molekul ATP yang digunakan yaitu dua ion  $K^+$  dipompa ke dalam sel dan tiga ion  $Na^+$  dipompa ke luar sel (gambar 3.20).



**Gambar 3.20.** Transpor aktif primer  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

**b. Transpor Aktif Sekunder**

Transpor aktif sekunder yaitu tidak menggunakan ATP secara langsung. Energi disediakan oleh gradien konsentrasi ion yang dihasilkan dari transpor aktif primer. Pada transpor aktif sekunder, konsentrasi Na<sup>+</sup> yang dimantapkan oleh transpor aktif primer menggerakkan transpor aktif sekunder dari glukosa. Perpindahan glukosa melintasi membran melawan gradient konsentrasi dibantu oleh protein simport untuk pergerakan ion Na<sup>+</sup> ke dalam sel (gambar 3.21).

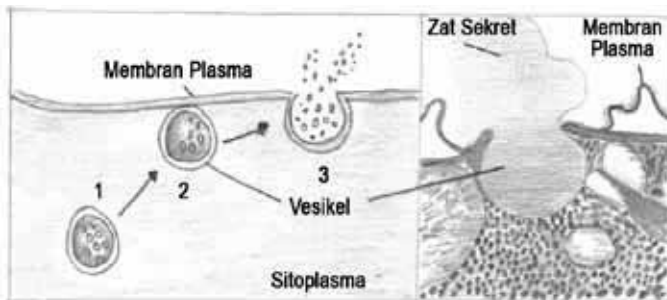


**Gambar 3.21.** Transpor aktif sekunder  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## Transpor Makromolekul

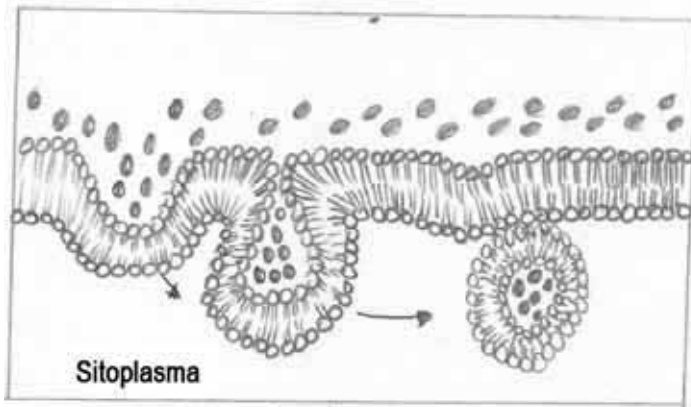
Transpor makromolekul adalah perpindahan makromolekul dari dalam/ke luar sel, ada dua macam yaitu :

- a. Eksositosis yaitu perpindahan molekul dari dalam ke luar sel (gambar 3.22).



**Gambar 3.22.** Eksositosis  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

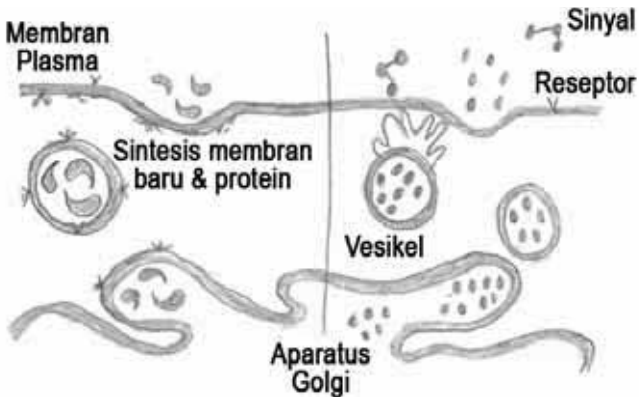
- b. Endositosis yaitu perpindahan/masuknya molekul dari luar ke dalam sel (gambar 3.23).



**Gambar 3.23.** Endositosis  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

**Eksositosis ada 2 macam :**

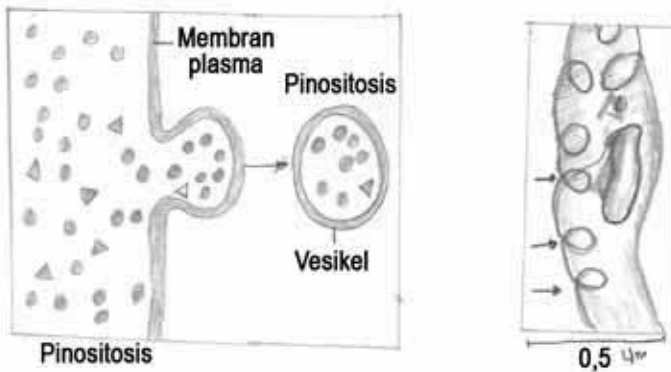
- a. Konstitutif yaitu suatu materi ditranspor dalam vesikula sekretori dan dikeluarkan ke tempat tujuannya dengan bantuan peptida sinyal yang terdapat pada protein yang ditranspor (gambar 3.24).
- b. Regulatif yaitu materi disekresikan dan disimpan dalam suatu vesikula dan baru dikeluarkan jika ada rangsangan (gambar 3.24).



**Gambar 3.24.** Eksositosis konstitutif dan regulatif (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

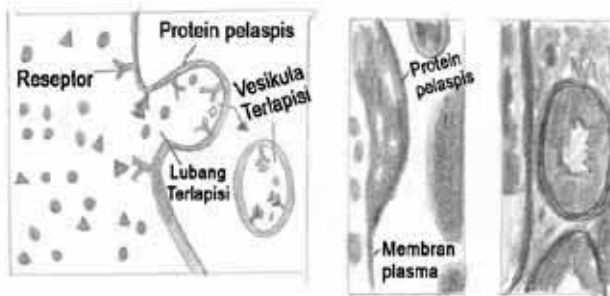
**Endositosis ada 3 macam :**

- a. Pinositosis adalah perpindahan cairan senyawa terlarut atau makromolekul tersuspensi dari luar ke dalam sel (gambar 3.25).



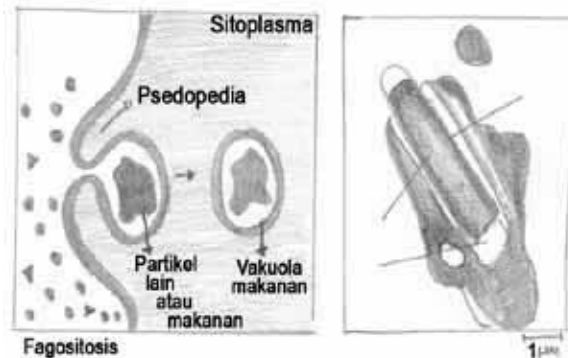
**Gambar 3.25.** Pinositosis (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

- b. Endositosis melalui perantara reseptor ('receptor-mediated endocytosis) adalah Pengikatan suatu senyawa tertentu pada reseptor yang ada pada membran plasma (gambar 3.26).



**Gambar 3.26.** Endositosis melalui perantara reseptor (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

- c. Fagositosis adalah partikel besar ( $> 0.5\mu\text{m}$  diameter) dari lingkungan terbentuk fagosom. Fagosom berperan bersama-sama dengan lisosom yaitu fagolisosom (gambar 3.27). Contoh sel : makrofage, neutrofil.



**Gambar 3.27.** Fagositosis (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)



## E. Pertanyaan Diskusi

1. Sebutkan dan jelaskan fungsi bagian-bagian membran plasma !
2. Jelaskan fungsi umum membran plasma !
3. Buatlah bagan konsep tentang transpor membran plasma !
4. Apakah yang dimaksud transpor aktif dan transpor pasif, berikan satu buah contoh masing-masing ?
5. Bagaimana transpor molekul berukuran besar ?



## Bab IV

# Badan Mikro

### A. Pendahuluan

Badan mikro adalah suatu organel yang dijumpai di dalam sel baik sel hewan maupun sel tumbuhan. Dengan menggunakan mikroskop elektron, badan mikro telah dapat diobservasi sejak pertengahan tahun 1950-an. Strukturnya sferikal atau avoid dengan diameter antara 0,5-1,5  $\mu\text{m}$ , kira-kira sebesar mitokondria dan lisosom dibatasi oleh adanya membran tunggal berisi matriks granular. Terdapat dua jenis badan mikro yaitu badan mikro yang berisi enzim katalase dan oksidase, dan badan mikro yang mengandung enzim-enzim untuk daur glioksisat selain katalase dan oksidase. Badan mikro yang berisi enzim katalase dan oksidase disebut peroksisom sedangkan badan mikro yang mengandung enzim-enzim untuk daur glioksisat selain katalase dan oksidase disebut glioksisom. Peroksisom umumnya terdapat pada sel-sel mamalia sedangkan glioksisom umumnya terdapat pada endosperm biji yang berperan pada saat perkecambahan.

Pada sel-sel hewan, distribusi badan mikro tersebar di dalam sel, akan tetapi umumnya di sekitar RE. Pada sel-sel tumbuhan, badan mikro sering berdekatan dengan kloroplas karena kedua organel tersebut terlibat dalam metabolisme jalur glikolat.

## B. Struktur

### 1. Peroxisom

Organel ini ditemukan pada sel hewan, sel tumbuhan tertentu maupun sel ragi. Peroxisom pertama kali ditemukan oleh De Duve dan kawan-kawannya pada tahun 1965 di dalam sel-sel hati. Di dalam peroksisom ditemukan beberapa macam enzim oksidase dan enzim katalase. Oleh karena enzim-enzim ini berperan dalam pembentukan katalase. Enzim-enzim ini juga berperan dalam pembentukan dan pembongkaran hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), maka organel tersebut dinamakan peroksisom. Pada sel tumbuhan, fungsi organel ini berkaitan dengan siklus glioksilat sehingga dinamakan glioksisom.

Di dalam sel, peroksisom berbentuk bulat telur dengan diameter kurang lebih antara 0,5 - 0,7 mikrometer, hanya dibungkus oleh selapis membran. Jumlah peroksisom untuk tiap sel bervariasi antara 70-700 mikrometer. Peroxisom memiliki kemampuan untuk membelah diri sehingga dapat membentuk peroksisom anak. Protein dan lipid yang diperlukan ditransfer dari sitosol. Selain berfungsi untuk pembentukan dan perombakan  $H_2O_2$  menjadi substrat

organik dan  $H_2O$ . Peroxisom (gambar 4.1) juga berfungsi untuk merombak asam lemak yang tersimpan dalam biji menjadi glukosa dan melibatkan serangkaian reaksi yang disebut siklus glioksilat, siklus glioksilat hanya terjadi pada tumbuhan untuk proses perkecambahan.



**Gambar 4.1.** Peroxisom

(Bruce Albert, et al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## 2. Glioksisom

Glioksisom merupakan badan mikro yang hanya ditemukan pada sel tumbuhan. Diameter glioksisom antara 0,5 sampai 1,0 mikrometer. Sedangkan peroksisom merupakan badan mikro yang ditemukan baik pada sel hewan maupun sel tumbuhan. Glioksisom banyak ditemukan pada biji-bijian yang berperan sebagai tempat menyimpan asam lemak untuk pembentukan energi dalam proses perkecambahan.

Salah satu proses utama pada biji yang sedang mengalami perkecambahan adalah perubahan dari asam lemak dalam glioksisom, menjadi karbohidrat atau disebut glukoneogenesis. Penguraian asam lemak menjadi asetil ko-A selanjutnya berubah menjadi oksaloasetat untuk membentuk sitrat. Asam sitrat yang terbentuk akan diubah menjadi glukosa melalui serangkaian reaksi enzimatik yang terdapat di dalam glioksisom.

## C. Komposisi Kimia dan Permeabilitas Badan Mikro

Membran yang membatasi badan mikro lebih tipis dari membran plasma, tebal 6-8 nm. Enzim yang terdapat pada membran badan mikro yaitu sitokrom b5 dan NADH-sitokrom b5 reduktase. Beberapa enzim lain ditemukan pada glioksisom. Dilihat dari komposisi lemaknya, membran glioksisom mengandung lebih rendah fosfatidil inositol dan kemungkinan fosfatidilserin, dan lebih tinggi kandungan lemak yang tidak teridentifikasi. Pada membran badan mikro terdapat substansi yang dapat menerima  $H^+$  dan NADH untuk diangkut ke luar dari badan mikro. Di luar badan mikro  $H^+$  diberikan kepada NAD sitosol. Setelah itu pengangkutan masuk kembali ke dalam badan mikro untuk mengulang tugasnya.

## D. Fungsi

### 1. Oksidasi Substrat pada Mamalia

Reaksi oksidasi pada peroksisom jaringan mamalia dipacu oleh enzim flavin oksidase yang menggunakan oksigen sebagai penerima elektron dan mengubahnya menjadi  $H_2O$  yang bersifat toksik bagi sel, karena itu harus segera diubah menjadi  $H_2O$  dan  $\frac{1}{2}O_2$  oleh enzim katalase di dalam peroksisom.

### 2. $\beta$ -Oksidasi Asam Lemak Mamalia

Peroksisom pada jaringan hati tikus mampu mengoksidasi palmitoil-KoA menjadi asetil-KoA. Asetil-KoA akan diangkut ke mitokondria untuk memasuki daur Krebs. Jika tetap berada dalam sitosol maka akan diubah menjadi asam lemak dan kemudian menjadi lemak netral. Oksidasi yang terjadi pada badan mikro, enzim flavin dehidrogenase bereaksi langsung dengan  $O_2$  dan menghasilkan  $H_2O_2$ .

### 3. $\beta$ -Oksidasi Asam Lemak pada endosperm biji tanaman

Sumber energi utama dalam perkecambahan adalah karbohidrat. Banyak biji yang cadangan makanannya berupa lemak, seperti kacang-kacangan, biji jarak, dan sebagainya. Jadi, kalau cadangan makanan dalam biji berupa lemak harus dikonversi menjadi karbohidrat. Reaksi ini terjadi di dalam glioksisom dan dipacu oleh enzim-enzim

yang terdapat di dalamnya. Hasil oksidasi asam lemak ini adalah asetil-KoA yang kemudian akan digunakan di dalam glioksisom untuk membentuk senyawa (asam) dengan 4 atom C, yaitu asam suksinat dibawa ke mitokondria sebagai bahan untuk proses glukoneo genesis. Di mitokondria asam suksinat akan dikonversi menjadi asam malat yang selanjutnya akan dibawa ke sitosol. Di sitosol asam malat diubah menjadi fosfoenol piruvat dan digunakan untuk sintesis glukosa. Jadi, inilah konversi cadangan lemak menjadi karbohidrat yang terjadi di dalam glioksisom endosperm selama perkecambahan.

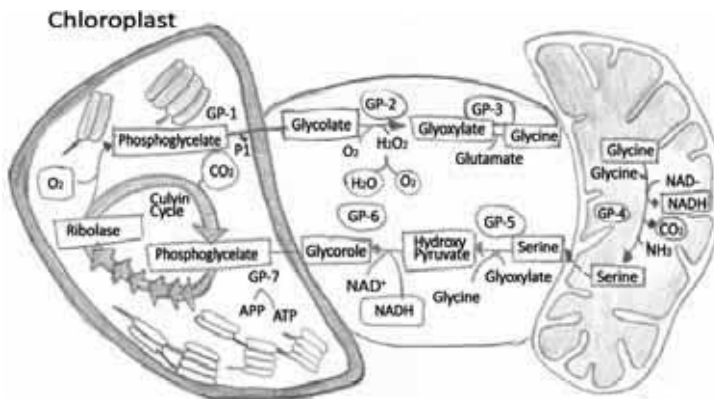
#### 4. Jalur Glikolat

Jalur glikolat merupakan serangkaian reaksi kimia yang terjadi di peroksisom dan bergandeng dengan siklus karbon di kloroplas. Jalur ini melibatkan kloroplas, peroksisom, mitokondria, dan sitosol. Jalur ini meliputi perubahan senyawa yang tidak mengandung fosfat yaitu gliserat menjadi glisin, serin, dan persenyawaan C1 dan ini penting sebagai prekursor dalam biosintesis asam inti.

Jalur glikolat dimulai di kloroplas dimana fosfoglikolat, glikolat, dan fosfogliserat dibentuk dalam fotosintesis. Glikolat meninggalkan kloroplas menuju peroksisom dengan perantaraan suatu pengemban atau pengangkut disebut glioksilat-glikolat shuttle. Dalam peroksisom, glikolat dioksidasi menghasilkan glioksilat dan membebaskan  $H_2O_2$  diubah menjadi  $H_2O$  dan  $\frac{1}{2} O_2$ . Glioksilat akan disintesis menjadi asam amino serin atau kembali ke kloroplas.

Asam amino glisin dibentuk dari gliksilat melalui reaksi interkoversi dalam mitokondria menjadi asam amino serin, suatu bagian dari siklus yang belum diketahui dengan jelas. Serin ditranspor kembali ke peroksisom lalu mengalami deaminasi menjadi oksalat dan kemudian direduksi menjadi gliserat. Gliserat kemudian ditranspor kembali ke kloroplas kemudian mengalami fosforilasi menjadi fosfogliserat.

Jalur ini membebaskan satu molekul  $\text{CO}_2$  menghasilkan satu molekul serin atau gliserat dari dua molekul fosfogliserat atau menghasilkan satu molekul serin atau satu molekul glisin ditambah persenyawaan  $\text{C}_1$  dari satu molekul fosfogliserat.



**Gambar 4.2.** Jalur glikolat

([www.scribd.com/doc/24801320/2/fotorespirasi](http://www.scribd.com/doc/24801320/2/fotorespirasi).)

Gambar ulang oleh Penulis)



## E. Pertanyaan Diskusi

1. Mengapa peroksisom dan glioksisom dikategorikan sebagai badan mikro?
2. Mengapa badan mikro sel tumbuhan letaknya berdekatan dengan kloroplas?
3. Apakah perbedaan peroksisom dan glioksisom?
4. Jelaskan fungsi peroksisom dan glioksisom!
5. Sebutkan enzim-enzim yang terdapat pada peroksisom dan glioksisom, lisosom!



## Bab V

# Nukleus

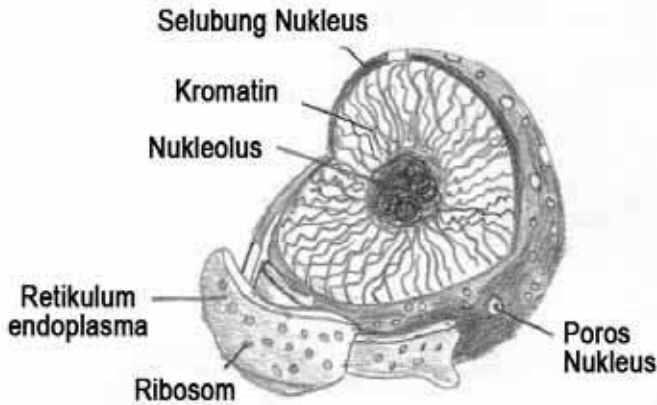
### A. Pendahuluan

Nukleus pertama kali diidentifikasi oleh Robert Brown (1831) selanjutnya banyak penelitian-penelitian yang dilakukan untuk meneliti nukleus. Tahun 1910, Koosel meneliti komposisi kimianya, tahun 1924 R. Fuelgen dan H. Rossenbeak menemukan cara menguji DNA. Tahun 1953 J.D. Watson dan Crick menemukan struktur DNA dan tahun 1957 A.R. Todd menemukan adanya nukleotida pada nukleus.

### B. Struktur Nukleus

Nukleus merupakan organel terbesar dalam sel yang mengandung DNA yang membawa informasi genetik. Nukleus berbentuk bola atau gelendong dan dikelilingi oleh selaput rangkap yang disebut selubung nuklear atau *nuclear envelope*. Di dalam nukleus terdapat nukleolus dan bahan informasi genetik atau materi genetik (gambar 5.1).

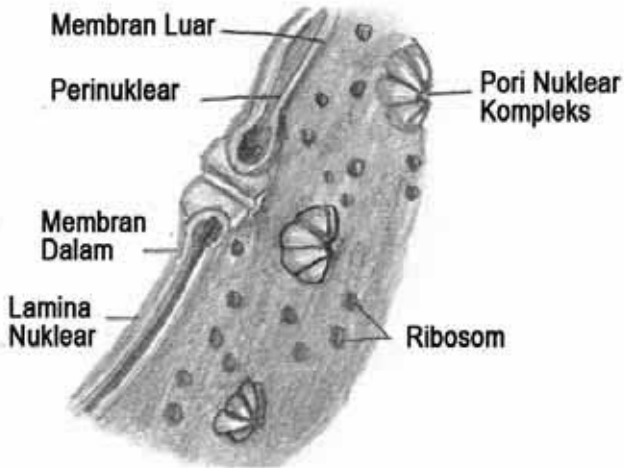
Organisme prokariot tidak memiliki nukleus sejati, materi genetik sel prokariota terkumpul di bagian tengah sel, tetapi tidak dipisahkan oleh selubung.



**Gambar 5.1.** Nukleus

(Bruce Albert, et. al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Selubung nuklear terdiri dari selaput rangkap (selaput dalam dan selaput luar) yang dipisahkan oleh ruang perinuklear. Selaput dalam disebut juga selaput nukleoplasmik, sedangkan selaput luar disebut selaput sitosolik. Ruang perinuklear akan berlanjut dengan ruang retikulum endoplasma dan dapat berisi protein yang baru disintesis. Permukaan selaput retikulum endoplasma dan permukaan sitosolik selaput luar ditempeli ribosom yang berperan dalam sintesis protein (gambar 5.2). Protein yang disintesis dalam ribosom dicurahkan ke dalam ruang perinuklear yang berhubungan dengan lumen retikulum endoplasma.



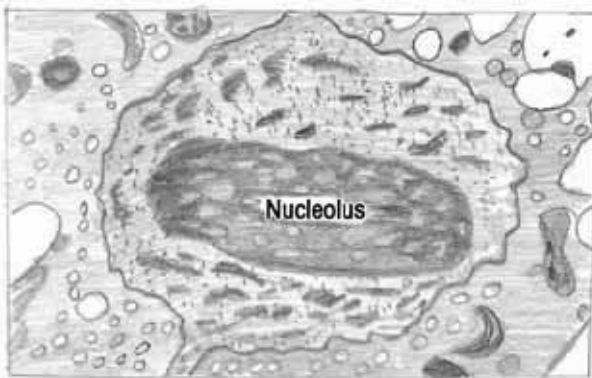
**Gambar 5.2.** Struktur selubung nuklear  
(Gerald Karp, 2010. Gambar ulang oleh Penulis)

Pada permukaan nukleoplasmik selaput dalam selubung nuklear berlapis anyaman yang terdiri dari filamen intermedia. Anyaman filamen intermedia disebut lamina nuklear. Pori nuklear terbentuk pada tempat dimana membran dalam dan membran luar selubung nuklear menyatu. Terdapat hubungan antara kerapatan pori nuklear dan pengangkutan RNA dari nukleus. Pada nukleus setelah mitosis, saat pengangkutan RNA banyak dan sintesis protein cepat, pori nuklear sangat rapat.

## Nukleolus

Pemasukan rRNA ke nukleolus harus cukup karena gen-gen terus ditranslasi. rRNA dikemas dengan protein-protein ribosomal membentuk ribosom. Pengepakan ini terjadi di

nukleolus (gambar 5.3). Nukleolus mengandung ikatan-ikatan DNA yang berasal dari beberapa kromosom. Setiap ikatan mengandung sekelompok gen rRNA. Tiap kelompok gen ini disebut NOR (nucleolar organizer region) yang merupakan daerah dimana rRNA disalin oleh polimerase RNA.



**Gambar 5.3.** Nukleolus

(Bruce Albert, et. al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Pengamatan struktur nukleolus dengan mikroskop elektron, terlihat bahwa nukleolus terdiri dari tiga daerah, yaitu :

1. Suatu pusat yang terdiri dari fibrila yang mempunyai daya serap terhadap warna sangat lemah. Pusat ini mengandung DNA yang belum disalin.
2. Kelompok padat yang terdiri dari fibrila yang mengandung molekul-molekul RNA yang baru saja disalin.
3. Daerah granula yang merupakan kelompok yang berbentuk butir-butir yang mengandung prekursor RNA

Nukleolus disebut sebagai ribosom producing machine. Di dalam nukleolus, jika terdapat polymerase RNA, terjadi transkripsi dan dibentuk RNA prekursor 45S. Dengan bantuan protein dari sitoplasma dan sebagian dari protein RNA. RNA hasil recycling bersatu dengan RNA membentuk badan yang lebih besar. Dengan RNA 5S dan bantuan polymerase RNA III, badan ribosom yang besar terurai menjadi sub unit besar dan sub unit kecil.

## **Nukleoplasma**

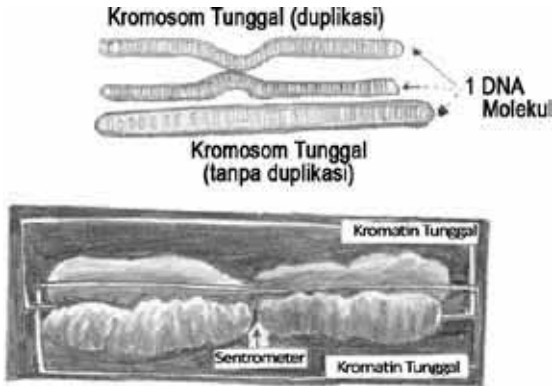
Nukleus memiliki substansi semacam sitoplasma karena letaknya di dalam membran nukleus disebut nukleoplasma. Nukleoplasma merupakan substansi transparan, semi solid. Di dalam nukleoplasma tersuspensi kromatin dan nukleolus. Komposisi tersusun dari asam nukleat (DNA dan RNA) yang merupakan materi genetik, protein, dan garam-garam mineral.

## **C. Materi Genetik**

Pada sel eukariotik terdapat materi genetik terdiri atas kromosom, RNA, DNA dan gen, materi genetik dikemas dalam genom-genom. Di sebagian besar genom tersaji dalam kesatuan-kesatuan kromatin. Setiap kesatuan-kesatuan kromatin. Setiap kesatuan merupakan bentuk padat dari kromatin disebut kromosom (gambar 5.4).

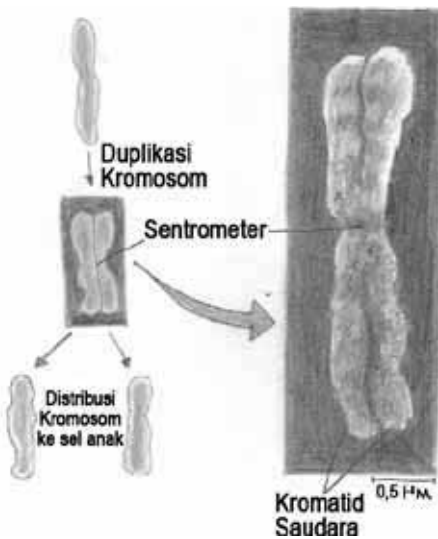
Kromosom memiliki sepasang lengan masing-masing berada sebelah menyebelah yang dipisahkan oleh suatu lekukan. Pada stadium metafase, kromosom bereplikasi

sehingga setiap kromosom tersusun dari dua kromatida. Dua kromatida diikat oleh mikrotubul kinetokor pada daerah disebut sentromer membentuk suatu lekukan sehingga nampak mempunyai dua pasang lengan.



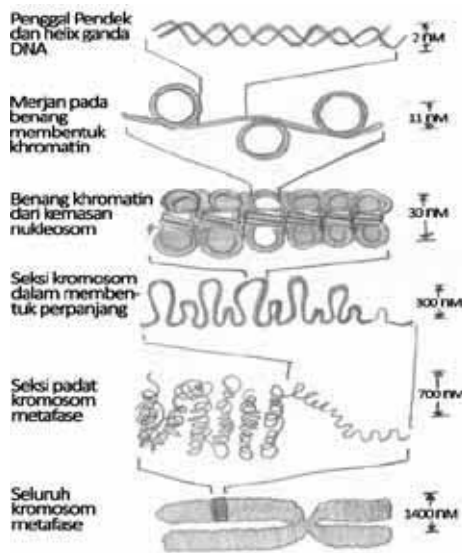
**Gambar 5.4.** Kromosom

(Bruce Albert, et. al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)



**Gambar 5.5.** Duplikasi dan distribusi kromosom selama mitosis. Kromosom terduplikasi itu terdiri atas dua kromatid saudara, yang menyempit di sentromernya. Kromatid terdiri atas serat kromatin yang sangat panjang yang terlipat dan tergulung dalam susunan yang rapat. Setiap serat kromatin, terdiri atas satu molekul DNA yang panjang yang terkait dengan molekul protein yang beragam. (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Sentromer berperan sebagai pusat gerakan kromosom selama stadium anafase. Pada saat interfase, bentuk kromosom berubah menjadi filamen-filamen halus disebut kromatin. Kromatin terdiri dari DNA, RNA, dan protein (gambar 5.6). Protein terdiri dari histon dan non histon. Kromatin apabila diamati dengan mikroskop elektron ternyata terdiri dari untaian manik-manik. Manik-manik tersebut berdiameter 10 nm, sedangkan filamen penghubungnya berdiameter 2 nm. Manik-manik disebut nukleosom. Nukleosom tersusun dari oktamer histon (4 pasang histon) disebut molekul pusat dan dililit oleh DNA setebal 2 nm. Rantai DNA mengelilingi histon dalam dua lilitan, setiap lilitan mengandung 83 pasang basa. Jadi jumlah keseluruhan ada 146 pasang dan satu oktamer histon.



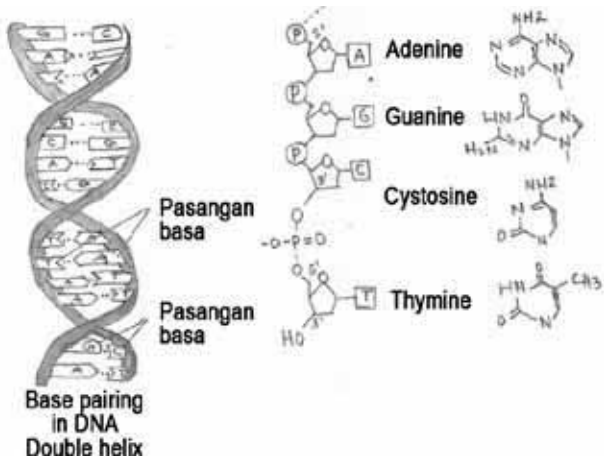
Gambar 5.6. Susunan Kromosom (Dokumen Penulis)



DNA terdiri dari dua molekul yang disusun seperti tangga disebut Double Heliks. Suatu molekul DNA terdiri dari jutaan subunit kecil disebut Nukleotida. Setiap nukleotida terdiri dari:

- a. Gugus fosfat
- b. Gula pentosa
- c. Basa nitrogen

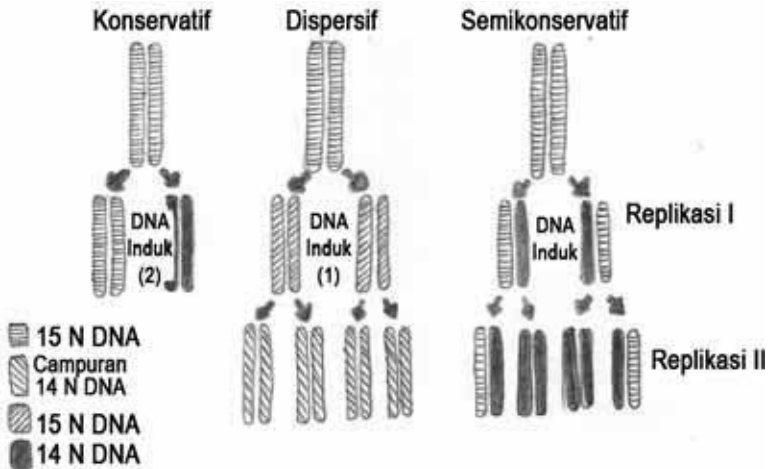
DNA tersusun dari deoksiribosa fosfat yang terikat pada basa nitrogen yaitu adenin, guanin, sitosin, dan timin (gambar 5.7). Adenin dan guanin disebut basa purin sedangkan sitosin dan timin disebut pirimidin. DNA membentuk suatu pilinan ganda (*double helix*) yang dihubungkan oleh ikatan hidrogen yang terbentuk antara basa purin dari pilihan yang satu dengan basa pirimidin dengan pilihan yang lain. Adenin berpasangan dengan timin, guanin berpasangan dengan sitosin.



**Gambar 5.7.** Struktur DNA dan Pasangan Basa Nitrogen (Bruce Albert, et. al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## D. Replikasi DNA

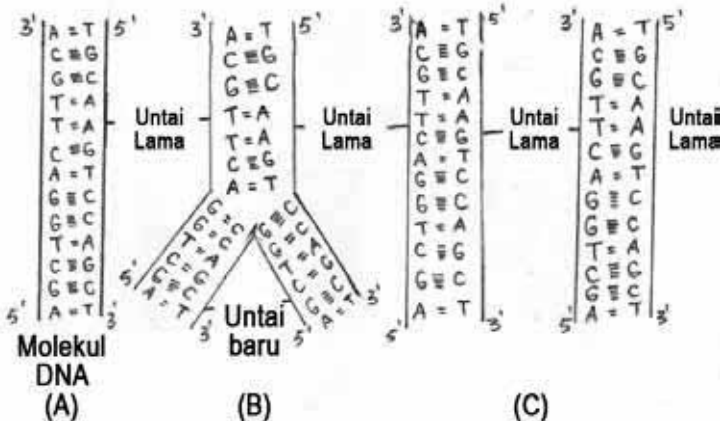
Pada replikasi DNA, rantai DNA baru dibentuk berdasarkan urutan nukleotida pada DNA yang digandakan. Replikasi merupakan proses pelipatgandaan DNA. Proses replikasi ini diperlukan ketika sel akan membelah diri. Pada setiap sel, kecuali sel gamet, pembelahan diri harus disertai dengan replikasi DNA supaya semua sel turunan memiliki informasi genetik yang sama. Pada dasarnya, proses replikasi memanfaatkan fakta bahwa DNA terdiri dari dua rantai dan rantai yang satu merupakan “konjugat” dari rantai pasangannya. Dengan kata lain, dengan mengetahui susunan satu rantai, maka susunan rantai pasangan dapat dengan mudah dibentuk. Ada beberapa teori yang mencoba menjelaskan bagaimana proses replikasi DNA ini terjadi. Tiga model replikasi yaitu konservatif, semikonservatif, dan dispersif (gambar 5.8). Model konservatif yaitu heliks ganda induk tetap dalam keadaan utuh dan sebuah salinan kedua yang sama sekali baru telah dibuat. Model semikonservatif yaitu kedua untai molekul induk berpisah, dan setiap untai berfungsi sebagai cetakan untuk mensintesis untai komplementer yang baru. Model dispersif yaitu setiap untai dari kedua molekul anak terdiri dari campuran antara bagian untai lama dan yang baru disintesis.



**Gambar 5.8.** Tiga Model Replikasi DNA  
(Bruce Albert, et. al., 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Untuk saat ini yang digunakan adalah model semikonservatif merupakan teori yang paling populer menyatakan bahwa pada masing-masing DNA baru yang diperoleh pada akhir proses replikasi, satu rantai tunggal merupakan rantai DNA dari rantai DNA sebelumnya, sedangkan rantai pasangannya merupakan rantai yang baru disintesis. Rantai tunggal yang diperoleh dari DNA sebelumnya tersebut bertindak sebagai “cetakan” untuk membuat rantai pasangannya. Model semikonservatif merupakan model yang tepat untuk proses replikasi DNA. Model replikasi ini telah dibuktikan oleh **Matthew Meselson** dan **Franklin Stahl** pada tahun 1958, dengan melakukan percobaan untuk menguji ketiga alternatif hipotesis replikasi DNA tersebut dengan menggunakan DNA

bakteri *Eschericia coli*. Hasilnya ternyata mendukung model replikasi semikonservatif.



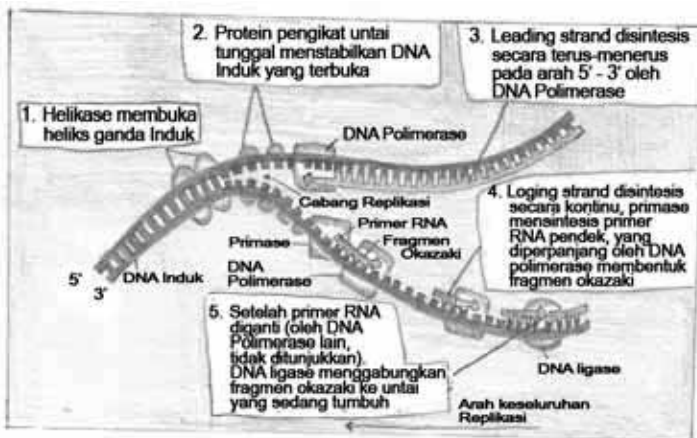
**Gambar 5.9.** Model Semikonservatif

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Proses replikasi memerlukan protein atau enzim pembantu antara lain enzim DNA polimerase, DNA ligase, DNA gyrase, dan Helicase. Salah satu yang terpenting dikenal dengan nama DNA polimerase, yang merupakan enzim pembantu pembentukan rantai DNA baru yang merupakan suatu polimer. Proses replikasi diawali dengan pembukaan untai ganda DNA pada titik-titik tertentu di sepanjang rantai DNA. Proses pembukaan rantai DNA ini dibantu oleh beberapa jenis protein yang dapat mengenali titik-titik tersebut, dan juga protein yang mampu membuka pilinan rantai DNA. Setelah cukup ruang terbentuk akibat pembukaan untai ganda ini, DNA polimerase masuk dan mengikat diri pada kedua rantai DNA yang sudah terbuka

secara lokal. Proses pembukaan rantai ganda tersebut berlangsung disertai dengan pergeseran DNA polimerase mengikuti arah membukanya rantai ganda. Monomer DNA ditambahkan di kedua sisi rantai yang membuka setiap kali DNA polimerase bergeser. Hal ini berlanjut sampai seluruh rantai telah benar-benar terpisah (gambar 5.10).

Proses replikasi DNA ini merupakan proses yang rumit namun teliti. Proses sintesis rantai DNA baru memiliki suatu mekanisme yang mencegah terjadinya kesalahan pemasukan monomer yang dapat berakibat fatal. Karena mekanisme inilah kemungkinan terjadinya kesalahan sintesis amatlah kecil. Pada DNA kemungkinan akan terjadi mutasi tetapi persentasenya sangat kecil sekali. Contoh mutasi pada sel tubuh yaitu sindrom down, sindrom kinfelter, mutasi pada sel kelamin yaitu buta warna, thalasemia.



**Gambar 5.10.** Replikasi DNA  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Apabila dikaitkan dengan kekuasaan Allah bahwa pembacaan DNA merupakan zikir. Pembacaan DNA oleh DNA polymerase yang berperan mensintesis DNA berdasarkan nukleotida yang ada pada rantai DNA templet. Pada proses replikasi DNA menjadikan DNA polymerase membaca kalimat-kalimat Allah pada DNA yang identik dengan “iqra” pada manusia. Apabila enzim DNA polymerase membaca DNA maka penciptaan manusia dimulai. Enzim DNA polymerase dapat membaca ulang atau mengoreksi urutan nukleotida yang salah pasangannya. Mekanisme ini disebut DNA repair. Jika nukleotida yang ditambahkan tersebut salah atau bukan pasangannya akan menghasilkan protein abnormal. Hal tersebut akan melahirkan anak-anak cacat. Allah telah menciptakan manusia yang sempurna kejadiannya seperti di Q.S. al-A'raaf : 201.

إِنَّ الَّذِينَ اتَّقَوْا إِذَا مَسَّهُمْ طَٰئِفٌ مِّنَ الشَّيْطٰنِ تَذَكَّرُوا فَإِذَا هُمْ مُبْصِرُونَ

*“Sesungguhnya orang-orang yang bertakwa bila ia kerasukan setan, mereka ingat kepada Allah, serta merta mereka menyadari kesalahannya”*

Berdasarkan ayat tersebut dan contoh pembacaan urutan nukleotida pada rantai DNA merupakan isyarat bagi manusia bahwa pembacaan yang dimaksud adalah “zikir”. Zikir ini dapat digunakan sebagai koreksi diri yang dengan cepat dapat menyadari dan menemukan kesalahan-kesalahan yang telah diperbuat manusia.

## E. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan mengapa nukleus disebut sebagai pusat pengatur sel!
2. Sebutkan bagian-bagian penyusun nukleus!
3. Sebutkan bagian-bagian penyusun kromosom!
4. Apakah perbedaan antara kromatin dan kromosom?
5. Bagaimana proses replikasi DNA?

# Organel dalam Sitoplasma yang Berfungsi untuk Sintesis Protein, Sekresi dan Absorpsi

## A. Pendahuluan

Pengetahuan sitologi pada mulanya didasarkan atas pengamatan sel dan jaringan yang telah difiksasi dan diwarnai. Mulai tahun 1899 perhatian para peneliti telah bergeser ke arah penelitian sel-sel hidup. Kerjasama antar sitologi dan biokimia lebih pesat lagi setelah ditemukannya mikroskop elektron dan dikuasainya teknologi fraksinasi komponen-komponen sel, sehingga dapat menghasilkan pengetahuan yang sangat berguna bagi biologi dan biokimia. Dari penemuan ilmu tadi dengan sitologi, maka berkembanglah biologi sel yang merupakan cabang ilmu mandiri.

Dalam mempelajari batas-batas dan dimensi biologi dapat diungkapkan wawasan bidang ultrastruktur dan biologi molekuler. Bidang ultrastruktur yang dikupas



meliputi stuktur-struktur penyusun sel yang hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop elektron.

Dalam menjalankan aktifitas hidupnya, sel sebagai unit fungsional terkecil makhluk hidup melakukan serangkaian fungsi fisiologis yang menunjang kehidupannya. Diantara fungsi fisiologis sel yang memegang peranan penting adalah mekanisme pembentukan protein atau sintesa protein. Sintesa protein melibatkan sejumlah organel yang terdapat di dalam sel. Dengan adanya sintesa protein sel dapat tumbuh dan berkembang, dapat menghasilkan suatu zat, memberikan respon terhadap rangsang dan sebagainya.

Pembahasan mengenai sintesa protein tidak terlepas dari mekanisme transporasi protein di dalam sel serta proses pelepasan atau sekresinya keluar sel. Dari uraian di atas muncul beberapa permasalahan yang akan dibahas lebih lanjut yaitu :

1. Organel-organel yang berperan dalam sintesa protein, absorpsi dan sekresi.
2. Mekanisma proses dari sintesa protein, transporasi protein, absorpsi dan sekresi.

Dengan membahas sintesa protein, absorpsi dan sekresi serta organel-organel yang terlibat di dalamnya. Diharapkan dapat menambah wawasan yang lebih mendalam mengenai biologi sel.

## B. Struktur Ribosom, RE, Golgi Kompleks dan Lisosom

### 1. Ribosom

Ribosom merupakan struktur atau kelompok multimolekuler yang berperan sebagai pabrik untuk sintesis protein. Selama proses penerjemahan, ribosom dibangun dari molekul-molekul protein dan rRNA. Jumlah ribosom di dalam suatu sel sangat banyak dan berbeda-beda sesuai dengan jenis organismenya. Untuk mengetahui bentuk, susunan dan komponen-komponen penyusun ribosom dilakukan pendekatan dengan cara:

- a. Pengamatan dengan mikroskop elektron.
- b. Dengan pemusingan

Pengamatan dengan mikroskop cahaya menunjukkan bahwa di dalam sel terdapat butir-butir halus yang bersifat basofilik. Untuk mengetahui butir-butir apakah sesungguhnya yang terlihat itu, dilakukan pengamatan dengan mikroskop elektron ternyata bahwa ribosom merupakan butir globular dengan garis tengah sekitar 150 – 200 Å. Butir-butir ini ditemukan dalam semua sel Prokariotik maupaun eukariotik.

Pada sel prokariotik terdapat bebas di sitosol, sedangkan pada sel eukariotik terdapat bebas di sitosol, matriks, mitokondria, stroma kloroplas, atau menempel pada permukaan sitolik selaput Retikulum Endoplasma (RE).

Hubungan struktural antara RE dan ribosom membentuk REG yang juga disebut ergatoplasma. Seringkali pula terlihat lingkaran-lingkaran kecil yang terdiri dari beberapa buah

ribosom. Bentuk ini disebut polisom. Ribosom terdiri dari dua bagian yang tidak sama besar, satu bagian kecil yang lainnya memiliki bagian yang besar.

Molekul-molekul rRNA bisa diuraikan dengan sistem unit Syedberg atau S yang mengindikasikan kecepatan relatif saat molekul-molekul mengendap dalam tabung sentrifugasi, ketika diputar dengan kecepatan tinggi. Semakin besar jumlah S menunjukkan semakin tinggi berat molekul.

**Tabel 1.** Koefisien Pengendapan (Sedimentasi) beberapa Makromolekul.

Molekul atau Struktur	Koefisien Sedimentasi	Berat Molekul
Ribosom		
Prokaryotik	70S	2.520.000
Eukaryotik	80S	4.220.000
RNA		
rRNA	5S	35.000
	16S	560.000
	18S	700.000
	23S	1.104.000
	28S	1.180.000
tRNA	4S	23.000-30.000
mRNA	5S-25S	25.000-1.000.000
Protein		
Sitokrom c manusia	1,175S	13.370
Hemoglobin manusia	4,46S	64.500

Ribosom sel-sel eukaryotik (gambar 6.1) dapat dibagi menjadi 2 buah subunit. Ribosom yang memiliki koefisien sedimentasi 80S yang terurai menjadi dua buah subunit masing-masing dengan koefisien sedimentasi 60S dan 40S. Ribosom sel-sel eukaryotik terdiri dua subunit, masing-masing memiliki koefisien sedimentasi 60S dan 40 S. Ribosom sub unit besar mempunyai tiga buah rRNA masing-masing dengan koefisien sedimentasi 28 S, 5,8 S dan 5 S serta 45-48 jenis protein, sedangkan subunit kecil memiliki hanya sebuah rRNA dengan koefisien sedimentasi 18 S dan 33 buah protein.

Ribosom Prokariotik (E Coli)		Ribosom Eukariotik (Rat)	
<b>Ribosom</b> ( $2,62 \times 10^6 \text{D}$ )		<b>Ribosom</b> ( $4,22 \times 10^6 \text{D}$ )	
<b>Sub Units</b>		<b>Sub Units</b>	
<b>RNA</b> 16S RNA (1542 nukleotida)	23S RNA (2904 nukleotida) 5S RNA (120 nukleotida)	<b>RNA</b> 18S RNA (164 nukleotida)	28S + 38S RNA (4716 + 160 nukleotida) (120 nukleotida)
<b>Protein</b> 21 Protein	31 Protein	<b>Protein</b> 35 Protein	49 Protein

**Gambar 6.1.** Struktur Ribosom Prokariotik dan Eukariotik  
(Dokumen Penulis)

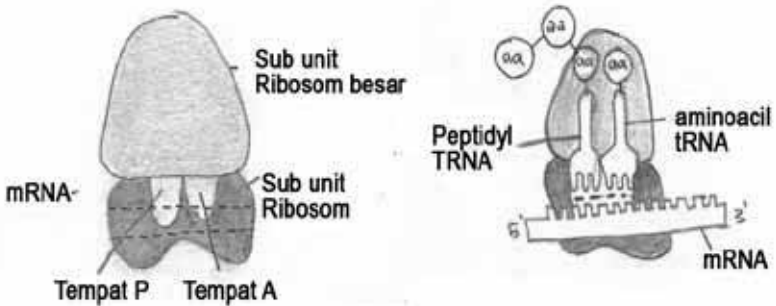
## Peranan Ribosom dalam Sintesis Protein

Dalam paparan ini, disajikan tinjauan tentang peranan ribosom. Ribosom yang terdiri dari molekul-molekul protein

dan rRNA berperan sangat penting dalam proses sintesis protein. Reaksi sintesis protein memerlukan pemandu katalitik yang rumit, yaitu: untuk meyakinkan bahwa kodon yang terdapat di mRNA dapat tepat berpasangan dengan antikodon yang ada tRNA, sehingga penerjemahan tidak meleset. Proses-proses lainnya dalam sintesis protein ini, dikatalisis oleh ribosom. Ribosom prokaryotik maupun eukaryotik memiliki peranan dan pola yang mirip satu sama lain. Masing-masing terdiri dari subunit besar dan subunit kecil. Dalam proses sintesis protein, subunit kecil mengikat mRNA dan tRNA, sedangkan subunit besar berperan dalam proses pembentukan ikatan polipeptida.

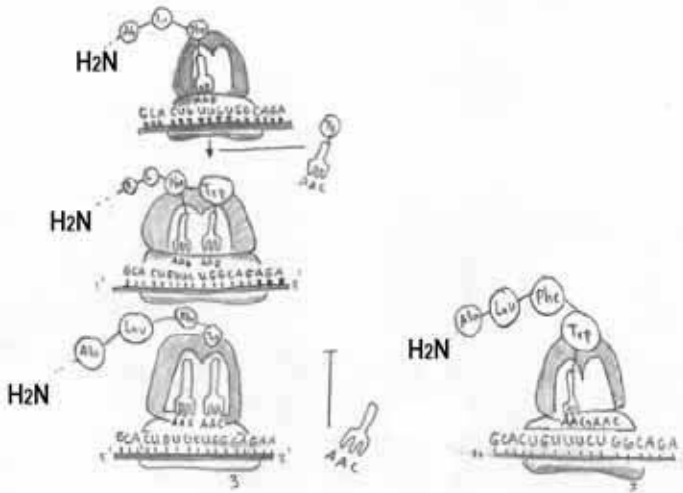
Lebih dari setengah berat ribosom terdiri dari rRNA yang memegang peranan utama dalam kegiatan ribosom sebagai katalisator. Ribosom memiliki tiga tempat pengikat molekul-molekul RNA, yaitu sebuah untuk mengikat mRNA dan dua buah untuk tRNA. Tempat-tempat tersebut diberi nama tempat P, yang berarti tempat pengikat tRNA peptidil dan tempat A, yang berarti tempat pengikat amino-tRNA-asil. Tempat p mengikat molekul tRNA yang berikatan dengan pangkal rantai polipeptida yang sedang tumbuh, sedangkan tempat A mengikat molekul tRNA yang masuk, dimuati asam amino molekul-molekul tRNA ini akan terikat erat pada tempat P maupun tempat A, apabila anti kodon yang ada padanya sesuai dengan kodon yang ada pada mRNA.

Tempat P dan tempat A ini sangat berdekatan, sehingga dua buah molekul tRNA harus membentuk pasangan basa dengan kodon di sampingnya yang berada di dalam molekul mRNA (gambar 6.2).



**Gambar 6.2.** Diagram struktur ribosoma dengan tempat-tempat A dan P (Dokumen Penulis)

Proses pemanjangan rantai polipeptida pada ribosom, terdiri dari tiga langkah, yaitu: 1) Sebuah molekul tRNA aminoasil terikat ke tempat A yang kosong, berdampingan dengan tempat P membentuk pasangan basa dengan 3 nukleotida mRNA yang terpapar di tempat A; 2) Pengikatan gugus karboksil bebas dari rantai polipeptida pada tRNA di tempat P dengan asam amino yang terikat pada tRNA di tempat A. Pengikatan ini menggunakan katalisator transferase peptidil, yang terdapat rRNA pada ribosom sub unit besar; 3) Terjadi perpindahan tRNA-peptidil baru dari tempat A ke tempat P, bersamaan dengan bergesernya ribosom pada mRNA. Akibatnya tRNA yang semula berada di tempat tergeser dari ribosom, dan kembali ke sitosol (gambar 6.3).

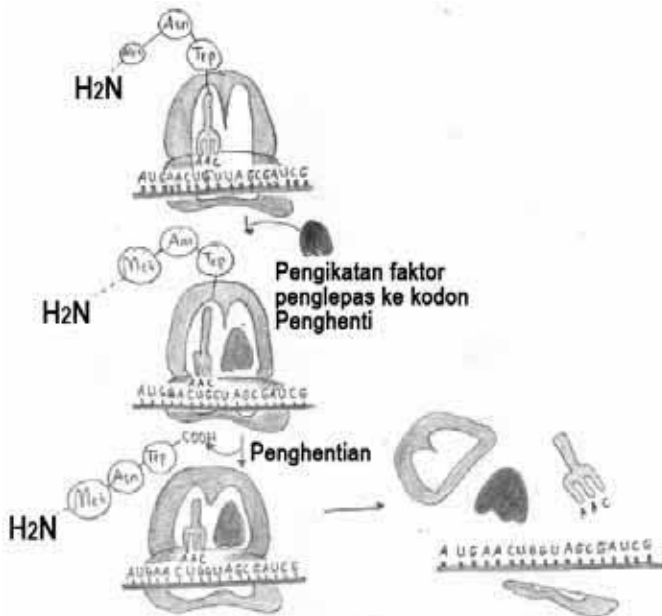


**Gambar 6.3.** Diagram Pergeseran Ribosoma pada Proses Sintesis Protein (Dokumen Penulis)

Tiga diantara 64 kodon (penyandi) pada sebuah molekul mRNA merupakan kodon penghenti, yaitu menghentikan proses penerjemahan. Sebuah protein sitoplasmik yang disebut protein pembebas segera terikat pada kodon penghenti yang mencapai tempat A pada ribosom. Pengikat ini mengubah kegiatan transferase peptidilo, dari mengikat asam amino ke tRNA peptidil menjadi mengikat air. Reaksi ini melepaskan gugus karboksil rantai polipeptida yang sedang tumbuh dari ikatannya dengan molekul tRNA. Dengan demikian rantai polipeptida segera dilepas ke sitosol, sedangkan ribosom meninggalkan mRNA, dan segera terurai menjadi sub unit besar dan kecil (gambar 6.4).

Kodon-kodon yang terdapat pada sebuah mRNA, dapat diterjemahkan oleh beberapa buah ribosom dengan

tRNA-nya. Penerjemahan ini berlangsung dengan beruntun, sehingga terbentuklah untaian ribosom, yang disebut ribosom atau polisom. Perlu diingat bahwa dari sebuah mRNA hanya terbentuk satu jenis polipeptida.



**Gambar 6.4.** Diagram proses berhentinya sintesis protein (Dokumen Penulis)

## Sintesis Protein

Sintesis protein adalah proses penerjemahan kodon-kodon pada mRNA menjadi polipeptida. Proses ini melibatkan berbagai jenis komponen sel, yang berperan penting dalam proses ini adalah kode genetik dan dikuatkan oleh tRNA yang berperan sebagai adaptor.



## Peranan tRNA dalam Proses Penerjemahan

Jenis-jenis molekul tRNA di dalam setiap sel, dibedakan satu sama lain oleh susunan nukleotidanya. Ditinjau dari segi fungsional, setiap tRNA dibedakan oleh kekhasannya untuk mengikat asam amino yang terlibat dalam proses sintesis protein. Setiap molekul tRNA mampu membentuk ikatan kovalen dengan asam aminonya dengan cara pemuatan atau aminoasilasi.

Asam amino ini terikat pada ujung lengan aseptor (penerima) tRNA. Proses aminoasilasi dipantau dan diatur oleh sintetase tRNA aminoasil. Setiap asam amino memiliki satu tRNA-aminoasil. Langkah pertama proses aminoasilasi adalah mengaktifkan asam amino yang gugus karboksilnya berkaitan dengan asam adenilat yang berasal dari ATP. Molekul intermedia ini tetap terikat pada enzim sampai asam adenilat diganti dengan molekul tRNA membentuk tRNA aminosil dan AMP. Kekhasan aminoasilasi merupakan fungsi dari tRNA aminoasil, yang mampu mengenali asam amino yang tepat maupun tRNA yang setara dengannya.

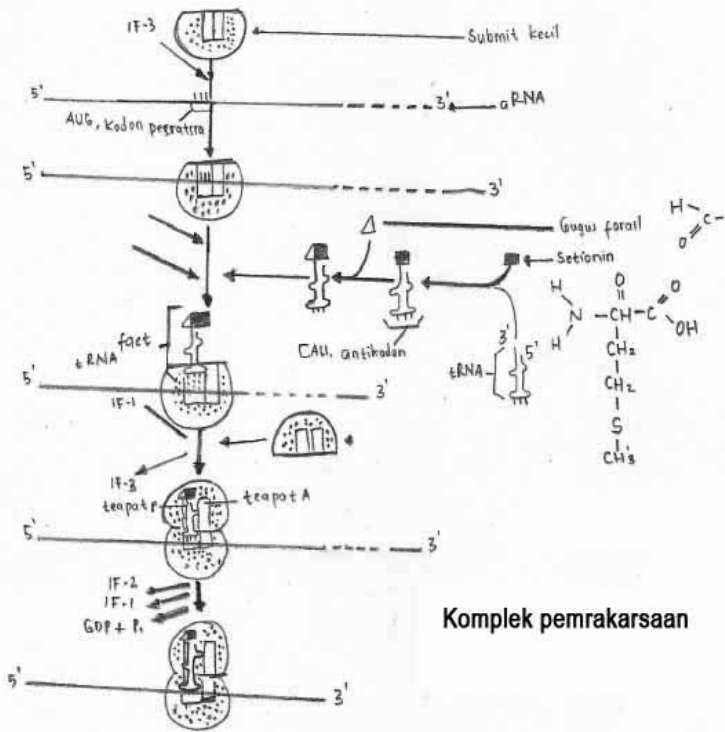
Setelah asam amino terikat pada bagian aseptor tRNA, molekul tRNA yang telah membentuk asam amino ini, harus menyempurnakan ikatan antara mRNA dan polipeptida dengan jalan mengikatkan ke penyandi yang tepat. Untuk menyalin penyandi (kodon) ini merupakan tugas lengan antikodon tepatnya trinukleotida yang disebut antikodon. Trinukleotida ini merupakan komplemen dari kodon, oleh karena itu dapat mengikatnya dengan pasangan basa.

## Mekanisme Sintesis Protein

Proses sintesis dibagi menjadi tiga tahap yaitu: pemrakarsaan (initiation), pemanjangan (elongation) dan penghentian (termination). Ketiga tahap ini berlangsung berkesinambungan.

### 1. Pemrakarsaan

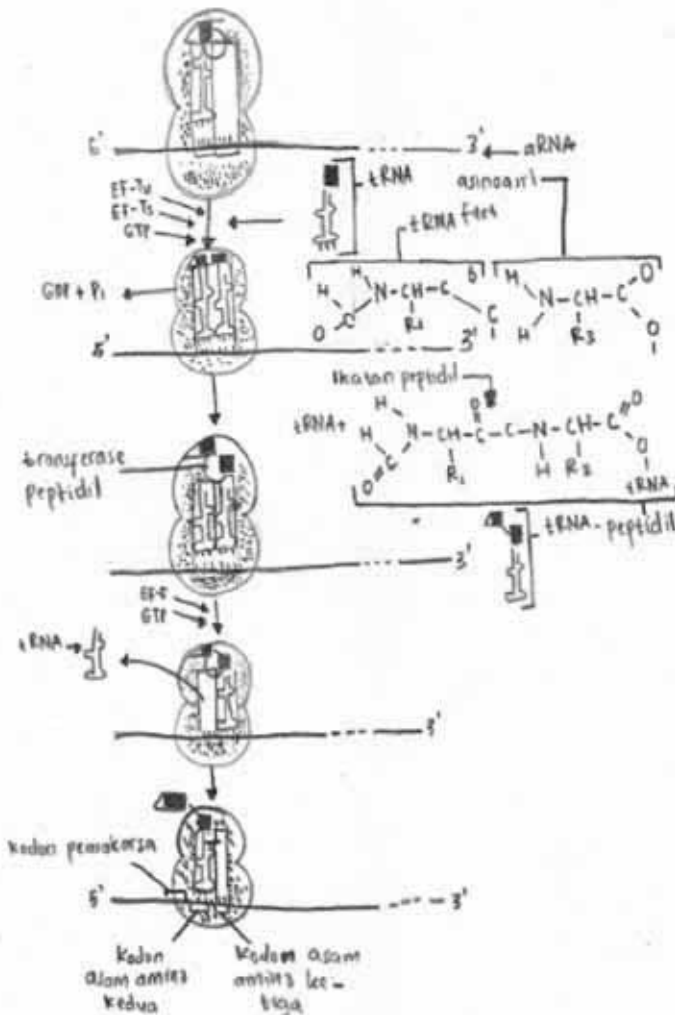
Awal dari proses pemrakarsaan adalah menempelnya ribosom subunit kecil ke molekul mRNA. Perlu diingat bahwa ribosom apabila tidak terlibat dalam proses sintesis protein, di dalam sitosol selalu tersebar menjadi subunit besar dan subunit kecil. Menempelnya ribosom subunit kecil pada mRNA tidak pada sembarangan tempat, melainkan pada tempat khusus sebelum kodon pemrakarsa dari gen yang akan disalin. Tempat khusus ini disebut tempat pengikat ribosom (gambar 6.5a).



**Gambar 6.5a.** Langkah – langkah tahap pemrakarsaan; pembentukan kompleks pemrakarsaan (Berkaloff, 1977. *Biologie et Physiologie Cellulaires*. Gambar ulang oleh Penulis)

2. Penterjemahan

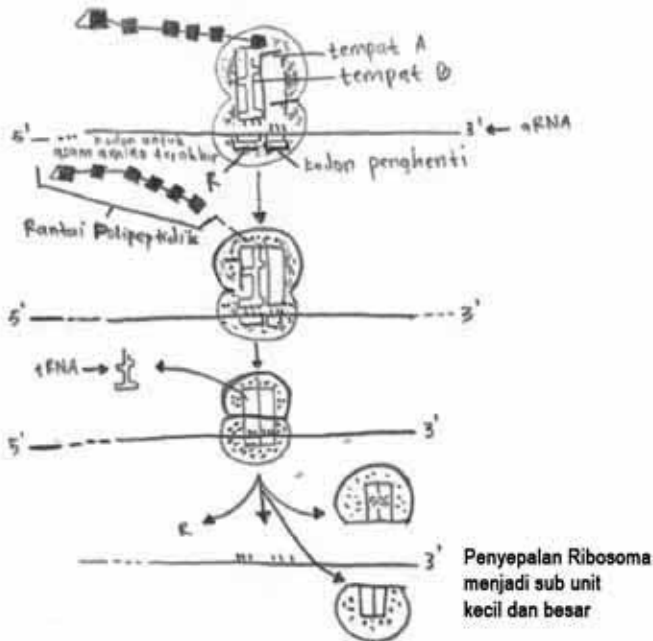
Dimulai apabila tRNA telah memuat asam amino berpasangan dengan kodon pemrakarsa yang terletak di subunit kecil ribosom. Asam amino yang terdapat pada tRNA pemrakarsa ini adalah N-formilmethionin atau fmet dengan jalan substitusi gugus formil (gambar 6.5b).



**Gambar 6.5b.** Langkah – langkah pada tahap pemanjangan (Berkaloff, 1977. *Biologie et Physiologie Cellulaires*. Gambar ulang oleh Penulis)

### 3. Penghentian

Penterjemahan akan berhenti apabila kodon penghenti masuk ke tempat pengikat amino tRNA asil. Tidak ada molekul tRNA satupun yang memiliki antikodon yang dapat berpasangan basa dengan kodon-kodon penghenti. Sebagai ganti molekul tRNA masuklah faktor pembebas ke tempat A., sehingga ribosom terurai menjadi sub unit kecil dan besar serta kembali ke sitosol untuk kemudian memulai lagi penerjemahan baru (gambar 6.5c).



**Gambar 6.5c.** Langkah-langkah pada tahap penghentian (Berkaloff, 1977. Biologie et Physiologie Cellulaires. Gambar ulang oleh Penulis)

Sintesis protein melibatkan suatu proses yang sangat kompleks melibatkan senyawa-senyawa kimia seperti asam amino, ribosom, energi, macam-macam RNA. Proses tersebut diawali oleh pembacaan kode genetik. Jadi perintah membaca sudah terjadi pada tingkat molekuler yaitu t RNA yang membacakan kode genetik m RNA. Asam amino yang 20 diantaranya terdapat 10 asam amino esensial yang harus didatangkan dari luar tubuh melalui makanan. Metionin merupakan salah satu asam amino esensial yang menarik untuk dianalisis.

Metionin merupakan asam amino yang mengandung unsur S (sulfur) dikode oleh AUG dan asam amino pertama yang dibaca oleh t RNA. Seolah-olah AUG merupakan kata pembukaan dalam sintesis protein. Setelah metionin ditempatkan pada urutan paling awal barulah asam amino lainnya tersusun di belakang metionin membentuk polipeptida atau protein. Dalam hal ini seolah-olah metionin sebagai pemimpin asam amino lainnya. Sesuai dengan sunatullah atau hukum alam bahwa makhluk hidup cenderung mempunyai pemimpin.

## Sistem Selaput Sitoplasmik

Sistem selaput sitoplasmik (selaput interna) diperlukan oleh sel-sel yang berukuran besar. Selaput sel sendiri, tampaknya tidak mampu mencukupi kebutuhan enzim yang diperlukan untuk kegiatan-kegiatan sel. Oleh karena itu diperlukan selaput-selaput tambahan. Pada dasarnya selaput sitoplasmik ini merupakan invaginasi maupun evaginasi berulang-ulang dari selaput sel. Namun, sifat-sifat fisik maupun struktur molekularnya tidak tepat sama. Selaput

sitoplasma membagi sitoplasma menjadi beberapa ruangan (kompartemen) yang ditinjau dari segi fungsinya berbeda-beda. Ruangan-ruangan beserta selaput pembatasnya disebut organel. Organel yang terdapat di dalam sel dibicarakan bersama, sebagai suatu sistem. Organel-organel tersebut adalah retikulum endoplasma (RE), kompleks Golgi dan lisosom.

## 2. Retikulum Endoplasma (RE)

Retikulum endoplasma (*endoplasmic reticulum*, ER) atau RE merupakan jejaring membran yang sedemikian ekstensif menyusun lebih dari separuh total membran dalam banyak sel eukariot. (Kata *endoplasma* berarti 'di dalam sitoplasma', sedangkan *reticulum* adalah kata Latin untuk 'jaring kecil'.) Semua sel eukariotik mengandung RE. Organel ini bukan organel yang statis, melainkan merupakan komponen dari suatu sistem selaput yang dinamis dan mudah dikenali. Sistem selaput ini mencakup semua selaput organel yang berada di dalam sel. Lima puluh persen dari semua selaput yang terdapat pada sebuah sel adalah selaput RE.

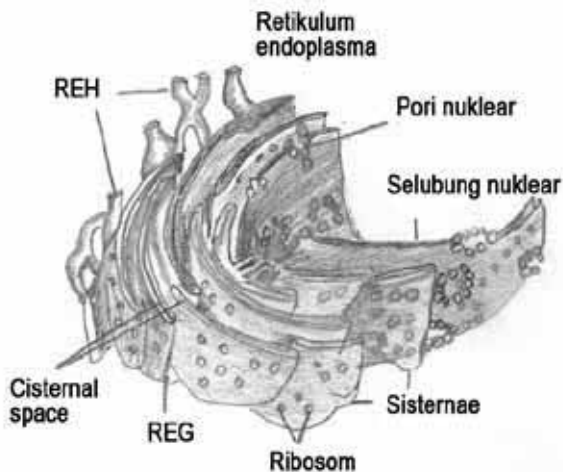
### Selaput RE

Selaput RE merupakan lembaran yang sangat terlipat-lipat, mengelilingi suatu ruangan yang disebut lumen RE atau sisterna RE yang berbentuk labirinth. Volume sisterna RE hampir 10% volume sel. Organel ini merupakan bangunan yang berbentuk ruangan-ruangan yang ber dinding membran dan saling berhubungan. Masing-masing ruangan mempunyai bentuk dan ukuran berbeda. Dapat dibedakan menjadi tiga jenis:

1. Sisterna, berbentuk ruangan gepeng yang kadang-kadang tersusun berlapis-lapis dan saling berhubungan.
2. Tubuler, berbentuk seperti pipa-pipa kecil yang saling berhubungan.
3. Vesikuler, berbentuk sebagai gelembung-gelembung yang berlapis-lapis.

## Struktur RE

Dari mikrograf elektron terlihat bahwa, terdapat dua daerah RE yang berbeda secara fungsional. Daerah ini diberi nama REG yaitu daerah yang permukaan sitosolik selaputnya ditemplei ribosom, dan REA yang secara fisik merupakan sebagian dari selaput yang sama, tetapi pada permukaan sitosoliknya tidak terdapat ribosom. Kedua daerah ini juga berbeda dalam bentuk dan susunan.



**Gambar 6.6.** Anatomi Susunan REG dan REA (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis).



## Retikulum Endoplasma Granular (REG)

Pada permukaan luar REG terdapat butir-butir ribosom. Ribosom yang menempel pada REG seperti juga ribosom bebas, tersusun dalam kelompok-kelompok yang kadang-kadang tampak melingkar-lingkar.

Ribosom tersebut berhubungan dengan molekul RNA. Sub unit besar, dan menempel pada membran vesikel RE. Sedangkan sub unit kecilnya bebas. Hasil sintesis protein sebagai benang polipeptida akan disimpan dalam ruangan RE melalui lubang yang terdapat pada membran RE struktur membran RE pada dasarnya tidak berbeda dengan struktur membran sel, yaitu terdiri dari dwilapis lipid. Selanjutnya protein sebagai hasil sintesis akan diangkut kedalam kompleks golgi, dengan cara melepaskan dengan gelembung-gelembung kecil (mikrovesikel). Mikrovesikel tersebut sudah tidak mempunyai butir-butir ribosom pada permukaan luarnya.

REG banyak ditemukan di dalam sel-sel kelenjar, terutama pada sel-sel kelenjar yang sedang aktif mensintesis secret. Pada pewarnaannya tampak basofil karena banyaknya REG. Pada sel kelenjar pankreas, dengan mikroskop cahaya, di daerah basalnya sel terlihat gambaran bergaris-garis basofil yang tidak lain adalah susunan RE kasar yang terdiri atas ruangan-ruangan gepeng yang permukaannya penuh dengan butir-butir ribosom. Lebih-lebih untuk sel-sel yang hasil sintesisnya berbentuk sebagai protein enzim, maka penampungan hal sintesis enzim tersebut sangat penting. Kalau tidak ditampung maka enzim-enzim tersebut akan merusak atau akan mencerna sitoplasma sel itu sendiri.

## Retikulum Endoplasma Agranular (REA)

REA dibandingkan dengan REG mempunyai perbedaan struktur dalam dua hal, yaitu tidak memiliki ribosom pada permukaan membrannya dan sebagian besar berbentuk tubuler yang saling beranyaman. RE sarkoplasmik adalah jenis khusus dari RE halus. RE sarkoplasmik ini ditemukan pada otot licin dan otot lurik. Yang membedakan RE sarkoplasmik dari RE halus adalah kandungan proteinya. RE halus mensintesis molekul, sementara RE sarkoplasmik menyimpan dan memompa ion kalsium. RE sarkoplasmik berperan dalam pemicuan kontraksi otot. Kadang-kadang dapat diamati bahwa REA ini berhubungan dengan REG.

Jumlah REA dalam sebuah sel sangat tergantung pada tipe atau jenis sel bersangkutan, sehingga hanya pada jenis-jenis sel tertentu saja REA ini tampak sangat menonjol. Keberadaannya hanya dapat dideteksi dengan mikroskop elektron. Di duga bahwa antara kedua jenis RE terdapat hubungan erat dengan melepaskan ribosomnya, REG dapat berubah menjadi REA. Fungsi REA diantaranya:

- 1) Sintesis fosfolipid dan kolesterol
- 2) Proses glikosilasi dan detoksifikasi
- 3) Transporasi lipid pada sel-sel epitel usus

## RE dan Biosintesis

RE merupakan pusat biosintesis pada sel. Protein transmembran dan lipida dari selaput RE, Golgi, lisosom, selaput sel, dan selaput organel yang lain, awal sintesisnya berhubungan erat dengan selaput RE. Protein yang disintesis dan direncanakan untuk berada di lumen RE, sisterna Golgi,

lumen Lisosom, maupun yang akan disekresikan, semula semua masuk ke dalam RE. dibagian ini akan dibahas sekilas beberapa biosintesis antara lain, biosintesis protein dan glikosilasi, fosfolipida dan kolesterol, detoksifikasi.

## Biosintesis Protein dan Glikosilasi

Butir-butir ribosom yang menempel pada selaput RE, mensintesis rantai polipeptida yang perpanjangannya tidak berada di sitosol melainkan menembus selaput. Sebagian dari rantai polipeptida ini tetap berada di selaput menjadi protein transmembran, bagian yang lain dilepas kedalam sisterna RE. Polipeptida atau protein transmembran diperuntukkan bagi selaput sel atau selaput-selaput organel lainnya, sedangkan protein-protein yang dituangkan kedalam lumen RE diperuntukkan bagi organela-organela atau disekresikan.

Perpindahan rantai polipeptida dari sitosol ke suatu organel tidak selalu berlangsung bersama-sama dengan proses penerjemahan, seperti yang terjadi pada RE. Perpindahan molekul protein dari sitosol ke mitokondria, kloroplas, dan peroksisoma terjadi setelah molekul-molekul itu selesai disintesis. Proses ini melibatkan hidrolisis ATP yang terdapat di sitosol. Energi yang terbentuk digunakan untuk mengurai lipatan molekul-molekul protein yang akan dipindahkan.

Sebagian besar protein yang berada di sisterna RE sebelum dibawa ke golgi, lisosom, selaput sel, atau ke ruang antar sel merupakan glikoprotein, yaitu suatu molekul yang memiliki rantai sakharida. Rantai obligosakharida ini terdiri

dari 14 buah monosakarida dan masing-masing berupa N-asetil glukosamin, manosa, dan glukosa. Oligosakarida ini selalu terdapat berikatan dengan gugus  $\text{NH}_2$  residu asparagin dari sesuatu molekul protein, oleh karena itu disebut oligosakarida terikat pada N atau oligosakarida terikat pada asparagin. Pemindahan oligosakarida ke molekul protein yang ada di RE dibantu oleh enzim transmembran yang gugus aktifnya berada dipermukaan luminal RE. Enzim ini disebut glikosil transferase. Oligosakarida ini diikatkan ke residu asparagin, segera setelah gugus itu berada di lumen RE.

### Biosintesis fosfolipida dan kolesterol

Selaput RE menghasilkan hampir semua lipida yang dipergunakan untuk pembaharuan selaput plasma, termasuk fosfolipida dan kolesterol. Sebagian besar fosfolipida yang disintesis adalah fosfatidilkolin yang disebut juga lesitin.

RE juga menghasilkan kolesterol, jenis molekul lipida ini dibuat di Golgi. Mengingat bahwa enzim yang berperan sebagai katalisator dalam proses ini berada di selaput Golgi bagian luminal, maka jenis lipida ini tidak pernah berada di sitosol, atau selaput plasma yang mengarah ke sitosol.

Sintesis kolesterol dari asam asetat berlangsung di selaput RE. Pengubahan kolesterol menjadi asam empedu dan hormon steroid, sesungguhnya merupakan proses hidrosilasi yang melibatkan oksigen, NADPH, dan sitokrom P450. Di dalam sel-sel penghasil hormon steroid, yang RE-nya sangat berkembang, sintesis kolesterol berlangsung pula ke selaput RE. dari selaput RE, kolesterol di bawa ke selaput dalam selaput mitokondria, yang merupakan zat hormon

steroid, kemudian di bawa kembali ke RE, dan disini dengan bantuan enzim-enzim yang terdapat di selaput RE diubah menjadi hormon steroid.

## Detoksifikasi

Daerah RE yang tidak ditemplei ribosom disebut retikulum endoplasma agranular (REA). Sebagiaian besar sel, memiliki sedikit REA sejati, sebagai gantinya terdapat RE yang sebagian daerahnya merupakan REA. Daerah seperti ini disebut daerah peralihan, karena dari sinilah timbul vesikuli pengangkut. Pada sel-sel khusus, terdapat REA dalam jumlah besar. REA ini mempunyai peranan khusus pula. REA terutama terdapat di dalam sel yang memegang peran penting dalam metabolisme lipida.

## 3. Kompleks Golgi

Kompleks Golgi, berada dari RE yang terdiri dari sebuah ruangan yang dikelilingi oleh selaput yang berlipat-lipat, terdiri dari beberapa buah ruangan dengan berbagai bentuk. Setiap ruangan dikelilingi oleh selaput yang strukturnya serupa denga selaput plasma umumnya. Berdasarkan nama asli yang menemukan pertama kali dan mengingat bahwa organel ini terdiri dari beberapa buah bentuk, maka disebut kompleks golgi. Organel ini pada umumnya berada di dekat inti (nukleus), dan pada sel hewan seringkali berdekatan dengan sentrosom.

Mikrograf dari preparat yang diimpregnasi dengan osmium tentraoksida menunjukkan adanya anyaman benang-benang yang berwarna hitam, di sekitar inti. Mikrograf

elektron dari sayatan ultra tipis sel yang sama, menunjukkan bahwa anyaman benang-benang hitam itu ternyata terdiri dari: setumpuk kantung pipih (sisterna) yang masing-masing berselaputkan selaput agranular, tumpukan kantung pipih ini disebut diktiosom, setiap kantung pipih disebut juga sakulus. Sebuah diktiosom memiliki dua permukaan yaitu permukaan cis atau pembentukan, yang erat hubungannya dengan daerah peralihan REG, dan permukaan trans atau pemasakan. Pada sel-sel sekretoris permukaan trans erat hubungannya dengan selaput sel (gambar 6.7)



**Gambar 6.7.** Golgi Kompleks

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis).

Susunan sakuli kompleks Golgi sangat bervariasi sesuai dengan jenis organisme, sel maupun keadaan fisiologi sel-sel tersebut. Analisis kimia kompleks Golgi menunjukkan bahwa senyawa yang terdapat di kompleks golgi serupa dengan senyawa yang berada di selaput sel maupun RE. Senyawa tersebut yaitu lipida yang terdiri dari fosfolipida dan lemak, protein yang terdiri dari glikoprotein, mukoprotein dan enzim.

Di dalam lumen diktiosom terdapat polisakarida, kadar polisakarida, semakin ke arah permukaan semakin tinggi. Demikian pula, tempat kegiatan enzim fosfat, berbeda untuk setiap sakulus pada diktiosoma, makin ke arah trans makin tinggi.

## Pemulihan Selaput Sel dan Sekresi

Vesikuli pengangkut yang dirangsang untuk segera melebur dengan selaput sel, meninggalkan kompleks golgi dengan aliran yang ajeg. Protein transmembran dan lipida selaput vesikuli ini akan menjadi protein dan lipida baru bagi selaput sel, sedangkan protein yang terlarut di dalam vesikuli disekresikan ke ruang antar sel. Dengan cara inilah sel menghasilkan protein dan substansi antar sel.

Proses sekresi diawali dari RE tempat terjadinya sintesis protein. Protein yang terbentuk dipisah-pisahkan kedalam daerah lumen RE sesuai tujuannya. Dari sini protein-protein tersebut diangkut ke Golgi daerah cis oleh vesikuli pengangkut, untuk diolah lebih lanjut dan kemudian dipindahkan ke Golgi daerah trans. Di jalinan trans mengalami pemilihan, untuk kemudian setiap jenis protein atau glikoprotein ditunaskan dalam bentuk vesikuli sekretoris. Apabila saat sekresi tiba, protein yang seharusnya dikeluarkan dari sel disekresikan dengan jalan eksositoris atau pertunasan.

Kajian dari sel-sel sekretoris menunjukkan bahwa pengeluaran senyawa sekretoris ke lingkungan ekstra sel berlangsung dengan cara eksositosis. Pada proses ini terjadi peleburan antara selaput vesikula sekretoris dengan selaput

sel. Akibat protein integral, glikoprotein dan glikolipida serta dwilapis lipida selaput vesikuli akan menjadi protein integral, glikoprotein, selaput sel. Mengingat bahwa penambahan rantai oligosakarida terjadi di lumen RE dan kompleks Golgi, maka penyebaran oligosakarida menyebabkan selaput RE dan Golgi makin asimetris. Keadaan tidak simetris ini dipertahankan sejak dari RE, Vesikuli pengangkut, kompleks Golgi sampai dengan ke selaput sel. Akibatnya semua rantai oligosakarida selaput sitoplasmik mengarah ke lumen, sedangkan pada selaput sel mengarah ke lingkungan luar sel.

Pada sel tumbuhan, kompleks golgi turut berperan dalam pembentukan bahan dinding sel. Polisakarida dari matriks yang baru terbentuk terlebih dahulu ditimbun di Golgi, sebelum dipindahkan ke dinding baru. Pada sel yang sedang membelah, terbentuk suatu lempengan atau sekat di antara dua buah anak inti. Sekat ini terbentuk akibat meleburnya beberapa buah vesikuli yang berisi pektin dan hemiselulosa yang berasal dari kompleks golgi. Kompleks gologi, tidak hanya berperan dalam pembentukan dinding sel sekunder.

#### **a. Lisosom**

Berbeda dengan organel-organel yang lain, lisosom ditemukan secara kebetulan, sekitar tahun 1950 de Duve dan kawan-kawannya mempelajari beberapa jenis enzim yang berperan dalam metabolisme karbohidrat. Salah satu enzim yang dipelajari yaitu fosfatase asam yang mencegah gugus fosfat dari beberapa substrat yang mengandung ester fosfat. Fosfatase ini diketahui bekerja pada pH rendah (asam). Semenjak itu diupayakan mengisolasi zat yang mengandung enzim tersebut dalam keadaan utuh.



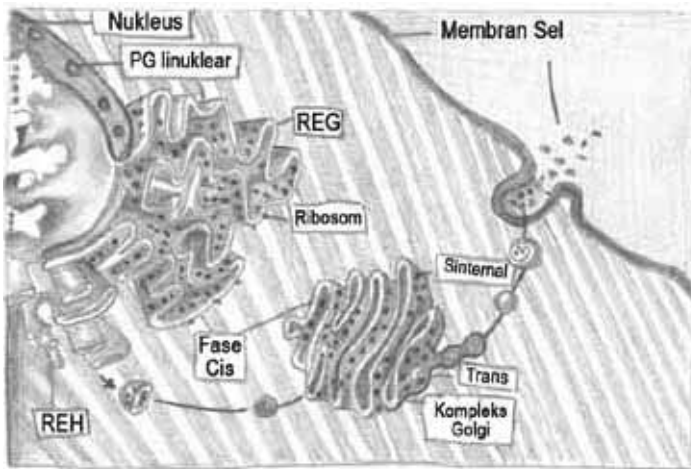
Di tahun 1955 Novikoff dengan menggunakan mikroskop elektron melihat adanya zat yang mengandung fosfatase asam pada serpihan yang diisolasi dengan cara khusus untuk menunjukkan adanya zat tersebut.

Kegiatan enzim di dalam zat-zat tersebut sangat bervariasi, misalnya, pada isolat yang dibuat dengan air suling kegiatan enzim lebih tinggi daripada yang dibuat dengan larutan sukrosa yang isotonik. Demikian pula, kegiatan enzim akan lebih tinggi dari sediaan yang telah disimpan beberapa waktu bila dibandingkan dengan sediaan segar. Penemuan-penemuan serupa untuk beberapa jenis enzim hidrolitik lainnya, secara beruntun dilaporkan sehingga zat yang mengandung enzim hidrolitik tersebut ditemukan sebagai organela baru, dan diberi nama lisosom. Organel ini berbentuk kantung kecil (vesikuli), dengan selaput tunggal. Dari analisis biokimia dapat diketahui bahwa enzim yang terbanyak terdapat di lisosom adalah fosfatase asam. Oleh karena itu enzim ini dinyatakan sebagai enzim penanda lisosom.

Lisosom sangat bervariasi dalam bentuk dan ukuran, namun bentuk ini tetap dapat diidentifikasi dengan teknik sitokimia sebagai satu jenis organel. Berdasarkan teknik ini ternyata lisosom dijumpai pada semua sel eukaryotik hewan maupun tumbuhan.

Ditinjau dari segi fisiologis terdapat dua kategori lisosom yaitu: lisosom primer yang hanya berisi enzim-enzim hidrolase dan lisosom sekunder yang berisi selain enzim hidrolase, juga substrat yang sedang dicerna. Lisosom

primer merupakan vesikuli atau granula sekretoris dengan diameter berkisar antara  $250\text{Å}$ - $0,1$  mikrometer, dengan kandungan sangat heterogen. Termasuk ke dalam kategori yang terakhir ini adalah vakuola pencernaan yang terbentuk dari peleburan endosom dengan lisosom primer, pada beberapa jenis sel hewan.



**Gambar 6.8** Skema beberapa jenis lisosoma di dalam sebuah sel  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Kandungan lisosom lebih dari 50 macam enzim berasosiasi dengan lisosom. Enzim-enzim tersebut dikelompokkan menjadi kelompok fosfatase, nuclease, hydrolase, protease dan enzim pemecah lipid. Contoh enzim lisosom.

Enzim	Substrat
Phosphatase : Acid phosphatase Acid phosphodiesterase	Phosphomonoesterus Phosphodiesteres
Nucleases : Acid ribonuclease Acid deoxyribinuclease	RNA DNA
Proteases : Cathepsin Collagenase	Protein Collagen
GAG-hydrolyzing enzymes : Iduronate Sulfatase B-galactosidase Heparan N-sulfatase $\alpha$ -N- Acetylglucosaminidase	Dermatan sulfate Keratan sulfate Heparan sulfate Heparan sulfate
Polysaccharidases dan Oligosaccharidases: $\alpha$ -glucosidase Fucosidase $\alpha$ -manosidase Sialidase	Glycogen Fucosyloligosaccharides Mannosyloligosaccharides Sialyloligosaccharides
Sphingolipid hydrolyzing enzymes : Ceramidase Glucocerebrosidase $\beta$ -Hexosaminidase Arylsulfatase	Ceramide Glucosylceramide GM2ganglioside Galactosylsulfatide
Lipid hidrolising enzymes : Acid lipase Phospholipase	Triacylglycerols Phospholipids

Dari kesemua enzim tersebut fosfatase asam adalah yang terbanyak. Enzim fosfatase yang lain adalah monofosfat dan fosfodiesterase asam yang substratnya oligonukleotida dan diester fosfat. Enzim yang tergolong dalam nuclease adalah RNA ase substratnya RNA dan DNA ase substratnya DNA. Asal lisosom keduanya yaitu berasal dari jaringan hewan, tumbuhan dan protista.

Proses pencernaan yang dilakukan lisosom meliputi proses sebagai berikut: pencernaan materi ekstrasel. Pada proses pencernaan materi ekstrasel, lisosom mencerna benda-benda asing yang tidak diinginkan yang berada di luar sel seperti pada bakteri. Materi ekstrasel yang akan dicerna oleh lisosom dibawa masuk melalui mekanisme endositosis, yaitu mengambil sel bahan dari lingkungan oleh invaginasi membran plasma yang meliputi:

1. Fagositosis
2. Autofagi
3. Pinositosis

**Peranan lisosom :**

- 1) Peran dalam apoptosis

Apoptosis atau kematian sel terprogram adalah mekanisme bunuh diri suatu sel.

- 2) Peran dalam pembuahan

Selama pembuahan, isi lisosom sperma dilepaskan keluar sel untuk melakukan pencernaan atas membran pembatas di sekeliling sel telur. Ini membantu penggabungan sperma dan sel telur.

- 3) Perbaikan membran sel

Lisosom dapat membantu perbaikan membran sel

dengan menggunakan hidrolase khusus yang disebut asam sphingomyelinase (ASM).

Kelainan genetik yang mengakibatkan ribosom tidak mensintesis enzim-enzim hidrolitik tertentu untuk digunakan oleh lisosom dalam tugasnya sebagai organel pencernaan. Akibatnya, materi yang seharusnya dicerna menjadi menumpuk oleh karena ketiadaan enzim-enzim tersebut. Penumpukan organel akhirnya menyebabkan kelainan-kelainan tertentu pada tubuh manusia, yang dapat dikenali dari tanda-tanda tertentu (Red Flag).

Red Flag symptoms pada LSD, LSD dapat dikatakan positif jika telah memasuki gejala Red Flag yang berupa :

- a. Bentuk wajah yang tidak lazim (kadang kala disertai dengan lidah yang membesar)
- b. Mata yang terlihat keruh/suram
- c. Ruam kulit biru-ungu
- d. Perut membesar/ terlihat menonjol (yang disebabkan oleh pembengkakan organ)
- e. Tubuh pendek, sukar untuk tumbuh /berkembang, deformitas rangka
- f. Otot lemah, kemunduran dalam kemampuan motorik

Kelainan ini bisa dilihat dari gejala-gejala fisik: splenomegali, gangguan penglihatan, kebutaan, hepatomegali, hidrosefalus, umbilical hernia, dystosis multiplex

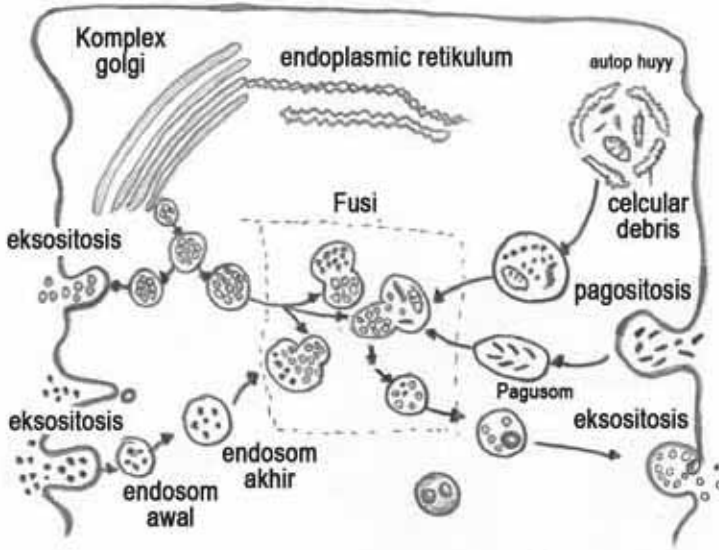
Prinsip pengobatan pada LSD: Transplantasi hematopoietic stem sel, terapi penggantian enzim (ERT), Terapi gen.

## Endositosis

Keaneka ragaman bentuk organel ini mencerminkan betapa bervariasinya pencernaan yang dilakukan oleh enzim-enzim hidrolase. Pada umumnya pencernaan ini berlangsung di dalam sel, bila bahan yang dicerna berasal dari luar, proses pencernaan disebut heterophagei, sedangkan bila dari dalam disebut autophagei.

Pada proses heterophagei bahan dari luar sel, masuk ke dalam sel dengan jalan endositosis sehingga terbentuk endosoma. Terjadi peleburan antara sebagian selaput lisosom primer dengan selaput endosoma, sehingga enzim lisosom tertuang ke vakuola leburan lisosom primer dan endosome sehingga proses pencernaan berlangsung. Terbentuk lisosom sekunder yang akan menjadi badan-badan residu, limbah pencernaan dikeluarkan dari sel dengan jalan eksositosis. Beberapa contoh proses heterophagei yaitu: pertahanan oleh netropil terhadap infeksi mikroba.

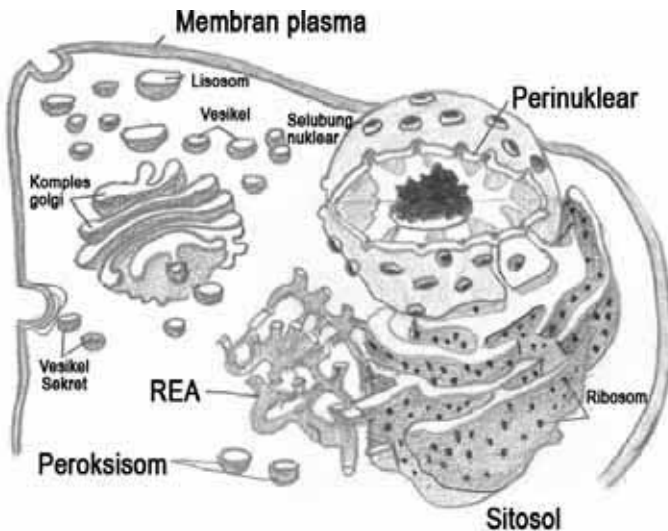
Berbeda dengan proses heterophagei, pada autophagei bahan yang menjadi substrat bagi hidrolase lisosom, berasal dari komponen sel itu sendiri. Pembentukan vakuola autophagei dapat berlangsung dengan berbagai mekanisme salah satu diantaranya terjadi sebagai berikut, sebuah sisterna RE, melengkung mengelilingi sebagian sitoplasma yang padanya terdapat berbagai jenis organel dan inklusi, misalnya ribosom, mitokondria, glikogen dan sebagainya. Lebih jelasnya untuk heterophagei dan autophagei disajikan pada gambar 6.9.



**Gambar 6.9.** Proses Heterophagei dan Autophagei (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Dari segi sitologi diperoleh keterangan bahwa lisosom merupakan hasil pertunasan sakuli golgi permukaan trans. Lisosom primer pada umumnya merupakan vesikuli pengangkut (gambar 6.9). Untuk memisahkan hidrolase lisosom dari enzim-enzim lain yang berada di tempat yang sama, pada prazat enzim lisosom ditambahkan gugus manosa-6-fosfat (M-6-P) sebagai tanda. Reseptor untuk M-6-P terdapat bergerombol di daerah selaput golgi, selain itu reseptor bagi M-6-P hanya mampu mengikat M-6-P pada pH7 dan melepaskan enzim lisosom pada  $\text{pH} < 6$ . Penurunan pH di dalam lisosom primer terdapat protein

pengangkut ion  $H^+$  kedalam lumen cairan yang berada di lumen menjadi sifat asam, akibatnya enzim-enzim lisosom terlepas dari reseptornya. Perlu diingat pula bahwa, protein-protein yang berada di selaput lisosom memiliki rantai sakharida yang panjang hal ini diperlukan untuk melindungi diri terhadap kegiatan enzim-enzim yang berada di dalam lisosom.



**Gambar 6.10**

Lisosom hasil pertunasan sakuli golgi kompleks permukaan trans  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)



## C. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan struktur ribosom, RE, golgi kompleks, dan lisosom!
2. Bagaimana mekanisme sintesis protein pada:
  - a) Fase inisiasi
  - b) Fase elongasi
3. Jelaskan kaitan antara RE K, golgi kompleks dalam kaitannya dengan fungsi golgi kompleks sebagai penyortir dan pengemas senyawa!
4. Jelaskan mekanisme lalu lintas vesikel dari REK, badan golgi, sampai ke sisi ekstraseluler!
5. Bagaimana perbedaan antara heterophagei dan autophage?

# Organel Pembangkit Tenaga

## A. Kloroplas

### 1. Pendahuluan

Kloroplas atau *Chloroplast* adalah bagian dari plastida yang mengandung klorofil. Khusus mengenai klorofil terdapat pada Q.S. Al-An'am : 99.

“Dialah yang menurunkan air hujan dari langit, lalu Kami tumbuhkan dengan air itu segala macam tumbuh-tumbuhan, lalu Kami keluarkan dari tumbuh-tumbuhan itu tanaman yang menghijau. Kami keluarkan dari tanaman yang menghijau itu butir yang banyak; dan dari mayang kurma mengurai tangkai-tangkai yang menjulai, dan kebun-kebun anggur. (Kami keluarkan pula) zaitun dan delima yang serupa. Perhatikanlah buahnya di waktu pohonnya berbuah dan (perhatikan pulalah) kematangannya. Sesungguhnya pada demikian itu ada tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi orang-orang yang beriman”.

Pada ayat tersebut Allah bercerita mengenai sebuah permasalahan penting mengenai kloroplas yang mengandung klorofil. Klorofil merupakan pigmen “hijau” yang berperan dalam fotosintesis. Ayat tersebut disempurnakan dengan menyebut nama-nama tumbuhan lain seperti kurma, zaitun, dan delima. Pada ayat tersebut pun disebutkan bahwa unsur-unsur pembentuk sel tumbuhan terdapat klorofil. Ayat ini ditutup dengan menyebutkan bahwa proses merupakan tanda-tanda dan salah satu bukti kebesaran mukjizat Allah SWT, tanda-tanda keimanan dan keindahan bagi orang-orang yang beriman. Demikianlah Maha Suci Allah yang memperindah kitab Nya dengan keakuratan makna ilmiah dan bahasanya.

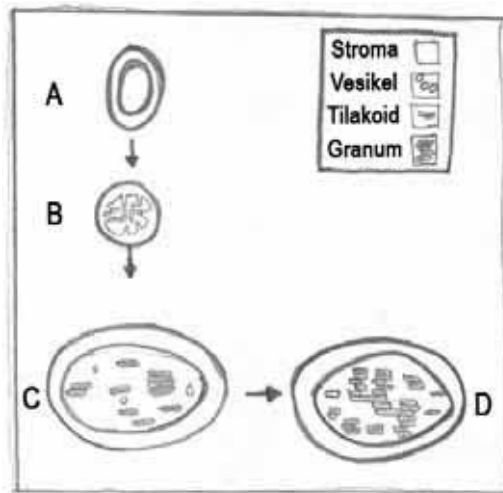
Hasil penelitian menunjukkan bahwa kloroplas ditemukan pada sel tumbuhan. Di dalam kloroplas berlangsung reaksi fase terang dan fase gelap dari fotosintesis tumbuhan. Pengamatan dengan mikroskop cahaya, dengan pembesaran yang paling kuat, kloroplas terlihat berbentuk butir. Kloroplas mengabsorpsi energi cahaya matahari dan menggunakannya untuk mensintesis karbohidrat dan molekul organik dari  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Reaksi internal melibatkan sintesis ATP melalui proses yang kurang lebih dekat dengan mekanisme kerja mitokondria.

Selain pada sel tumbuhan, kloroplas ditemukan pada alga, beranekaragam bentuk kloroplas. Kloroplas berbentuk pita spiral ditemukan pada *Spirogyra* sp, sedangkan yang berbentuk jala ditemukan pada *Cladophora* sp, sedangkan kloroplas berbentuk pita ditemukan pada *Zygnema* sp.

Kloroplas merupakan bagian dari plastida. Macam-macam plastida berdasarkan ada dan tidak adanya pigmen, antara lain : kloroplas, kromoplas, dan leukoplas.

### Biogenesis Kloroplas

Kloroplas diduga mengalami perkembangan (evolusi) dari proplastida menjadi kloroplas. Tahap-tahap perkembangannya sebagai berikut (gambar 7.1)



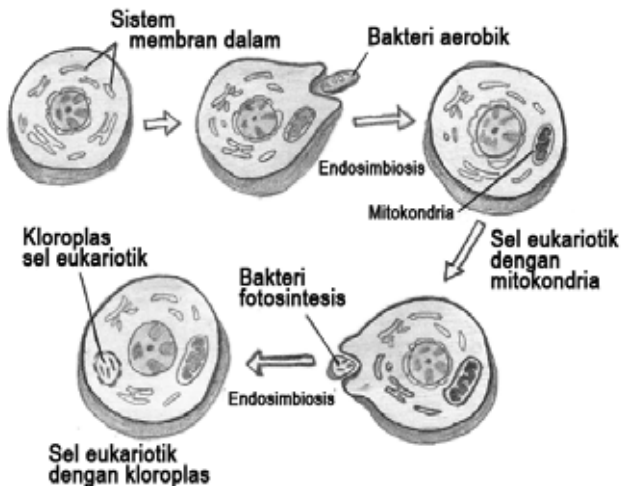
**Gambar 7.1.** Perkembangan Proplastida menjadi Kloroplas  
(Muslim, 2003. Gambar ulang oleh Penulis)

#### **Keterangan Gambar:**

- Proplastida: memiliki membran luar dan membran dalam
- Membran dalam: cahaya memicu sintesis klorofil, fosfolipid, stroma kloroplas, protein tilakoid, dan petunasan vesikel kecil

- c. Proplastida membesar dan fusi beberapa vesikula tilakoid menjadi Grana
- d. Proplastida semakin membesar sehingga Tilakoid semakin jelas dan tumpukan Grana menebal dan membesar

Hipotesis Endosimbiosis menyatakan adanya DNA pada Plastida dan Struktur membran organel rangkap, data-data biologi molekuler. Hal tersebut diungkapkan oleh Lynn Margulis (1970) dalam bukunya *The Origin of Eukaryotic Cells (Asal Usul Sel-Sel Eukariotik)*, bahwa kloroplas berasal dari prokariot purba yang berfusi ke dalam sel eukariot tanaman dewasa modern (gambar 7.2).

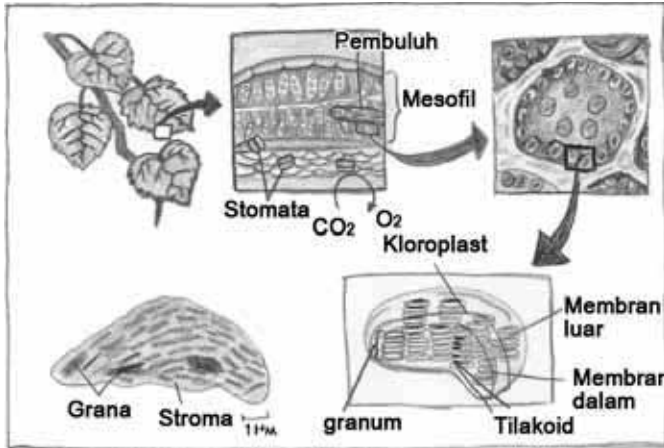


**Gambar 7.2.** Teori Endosimbion pada Kloroplas  
(Campbell *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

## 2. Ultra Struktur Kloroplas

Kloroplas umumnya berbentuk lensa, organel berukuran kecil seperti mitokondria. Tergantung pada kondisi cahaya, kloroplas dapat bergerak dalam sel, misalnya ke permukaan untuk menangkap lebih banyak cahaya pada kondisi cahaya yang sedikit. Kloroplas berperan sebagai organel untuk menghasilkan energi melalui proses fotosintesis. Kloroplas hanya terdapat pada tumbuhan. Jumlah kloroplas antara 50 – 200 setiap sel. Bentuknya dari samping seperti lensa, satu sisi cembung, sisi lainnya cekung atau datar, mempunyai sistem dua membran yaitu membran dalam (inner membrane) dan membran luar (outer membrane). Diantara membran luar dan dalam terdapat ruang antar membran (inter membrane). Stroma mengelilingi ruang ketiganya dibatasi membran tilakoid.

Fungsi Kloroplas sebagai tempat fotosintesis. Pada setiap  $\text{mm}^2$  permukaan daun terdapat 0,5 juta kloroplas. Warna daun berasal dari klorofil. Energi cahaya diserap klorofil untuk sintesis molekul makanan dalam kloroplas. Kloroplas pada mesofil yaitu pada jaringan palisade dan spons (gambar 7.3). Stomata adalah tempat  $\text{CO}_2$  masuk dan  $\text{O}_2$  keluar. Berkas pembuluh xilem menyalurkan air dari akar ke daun. Berkas pembuluh floem mengirimkan gula ke akar dan bagian-bagian dari tumbuhan yang tidak berfotosintesis.



**Gambar 7.3.** Kloroplas dan Bagian-bagiannya  
(Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

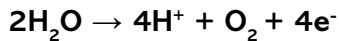
### 3. Tahapan Fotosintesis

Fungsi kloroplas adalah tempat fotosintesis (gambar 7.4). Berikut adalah tahapan-tahapan pada fotosintesis, antara lain:

a. Reaksi Terang :

Pada reaksi terang terjadi transfer elektron di grana. Fotofosforilasi berupa sinar matahari ditangkap klorofil menghasilkan ATP dan koenzim tereduksi NADPH. Kedua produk tersebut penting untuk asimilasi karbondioksida. Terdapat dua sistem fotokimia yaitu fotosistem I (PS I) dan fotosistem II (PS II). Keduanya merupakan pusat reaksi pada kloroplas. PS I berisi klorofil a 670, klorofil a 695, dan sejumlah klorofil khusus yang mengabsorpsi cahaya dengan

panjang gelombang 700 nm disebut P 700. Jika cahaya mengenai PS I maka elektron klorofil akan mengalami eksitasi dan menjalar di antara klorofil ke P 700. Pengaktifan P 700 menyebabkan terjadinya transfer sebuah elektron ke aseptor elektron (x) diduga ferridoksin atau quinon. Dari aseptor X melalui ferridoksin 540 digunakan untuk mereduksi NADPH elektron akan kembali melalui FD 590 dan sitokrom b6 ke P 700 (siklik). Pada waktu P 700 melepaskan elektronnya (fotooksidasi) akan segera kembali seperti semula dengan menerima elektron dari plastosianin (PC). PS dengan sitokrom f berdekatan dengan P 700 berfungsi untuk transpor elektron berasal dari PS II. Fotosistem II berisi klorofil b, klorofil a 670, klorofil a 680. Pusat reaksi adalah klorofil a yang mengabsorpsi cahaya dengan panjang gelombang 680 nm disebut P 680. Akseptor elektron diberi nama Q. Akseptor ini dapat menghilangkan fluoresensi klorofil a pada PS II. Akseptor berupa plastokuinon. Setelah elektron diterima Q, elektron akan bergerak menurunkan potensialnya melalui sitokrom b 559 dan lastuquinon ke P 700. Pusat reaksi fotokimia P 680 direduksi kembali dengan elektron yang berasal dari dari H<sub>2</sub>O dengan reaksi sebagai berikut :



Aliran elektron dimulai dari air dan berakhir pada koenzim yang tereduksi atau NADPH. Pada proses ini terlihat bahwa air mengalami fotolisis menghasilkan oksigen dan substrat direduksi disebut Reaksi Hill.

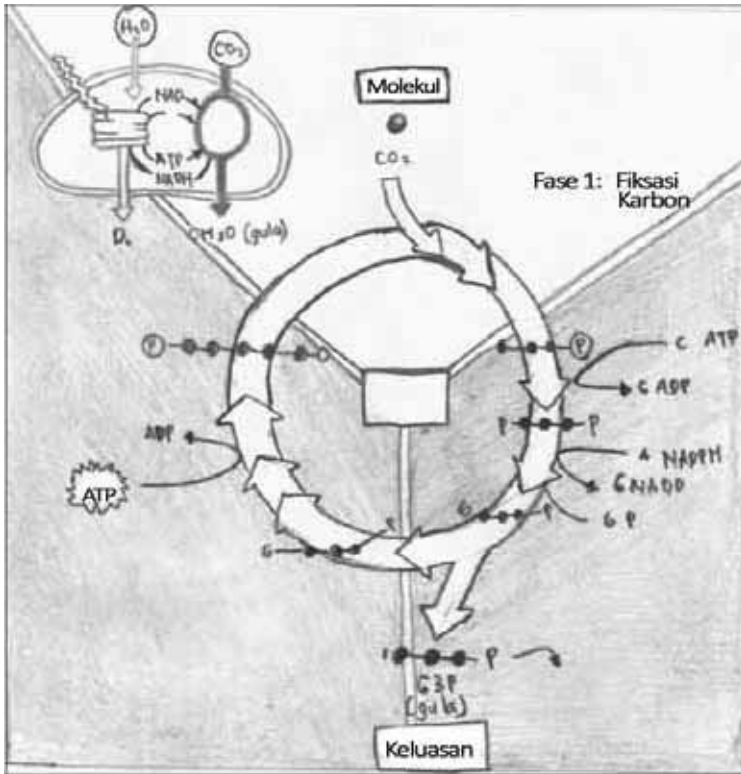
Aliran elektron dari air sampai ke NADPH dinamakan aliran elektron nonsiklik. Aliran elektron nonsiklik adalah aliran elektron yang utama dalam fotosintesis di samping aliran elektron siklik yaitu aliran elektron dari P 700 kembali



lagi ke P 700 melalui sitokrom b 6. Pada keadaan tertentu aliran elektron dari P 680 dapat kembali lagi ke P 680 melalui sitokrom b 559 disebut aliran elektron siklik. Aliran elektron non siklik menghasilkan ATP dan NADPH sedangkan Aliran elektron siklik hanya menghasilkan ATP saja.

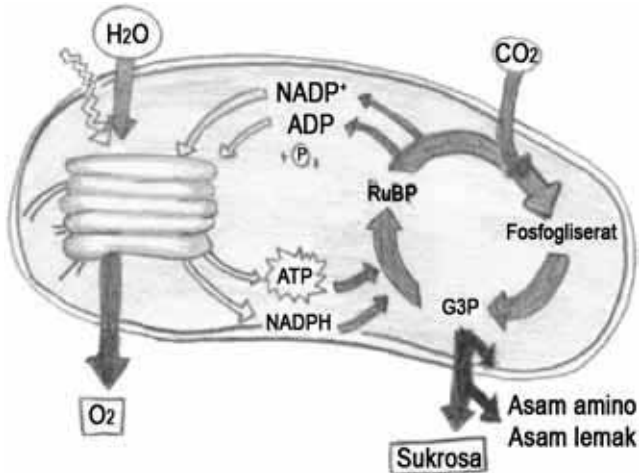
#### b. Reaksi Gelap

ATP dan NADPH hasil reaksi terang akan dibawa ke stroma untuk konsumsi reaksi gelap. Selama reaksi pada tumbuhan secara umum (C3), karbondioksida difiksasi dengan pengikatan ke ribulose difosfat dan seterusnya direduksi oleh NADPH. ATP berperan sebagai sumber tenaga untuk reaksi endergonik ini, produk akhir adalah karbohidrat biasanya dalam bentuk gula kemungkinan disimpan sebagai amilum. Pada tumbuhan C4, karbondioksida mula-mula difiksasi sebagai suatu asam 4-karbon dalam kloroplas pada sel mesofil kemudian ditransfer ke sel sarung berkas pengangkut tempat terjadinya reaksi siklus Calvin dan amilum disimpan (gambar 7.4).



**Gambar 7.4.** Siklus Calvin  
(Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

Untuk lebih jelas antara reaksi terang dan reaksi gelap disajikan pada gambar 7.5.



Gambar 7.5. Reaksi Terang dan Reaksi Gelap  
(Becker W. M. at. Al The world at the cell, 3 rd ed. Menlo Park, CA Benjamin Euningham, 1996. Gambar ulang oleh Penulis)

#### 4. Pertanyaan Diskusi

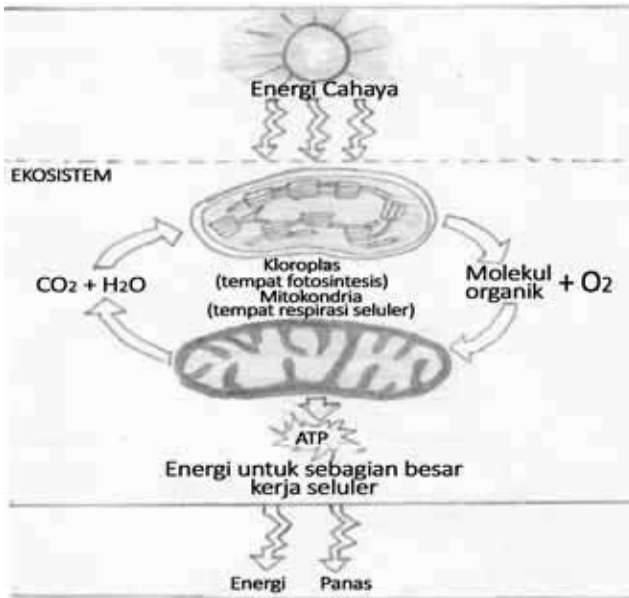
- 1) Mengapa kloroplas dikatakan sebagai organel pembangkit tenaga?
- 2) Gambarkan struktur kloroplas dan sebutkan struktur yang berperan dalam fotosintesis!
- 3) Apa yang terjadi dalam membran tilakoid dan stroma kloroplas?
- 4) Terangkan apa yang terjadi dalam reaksi terang di kloroplas!
- 5) Terangkan apa yang terjadi dalam reaksi gelap di kloroplas!

## B. Mitokondria

### 1. Pendahuluan

Mitokondria adalah organel sel yang dikenal sebagai “the power of sel” atau menghasilkan energi (dapur sel). Nama mitokondria dibangun dari dua suku kata berbahasa Yunani yaitu mito = benang dan chondrion = granula. Jadi mitokondria adalah organel sel yang berbentuk memanjang atau granula. Mitokondria dibatasi oleh membran rangkap, membran dalam mengadakan perluasan ke dalam matriks dengan membentuk penonjolan-penonjolan disebut krista. Membran tersusun oleh lipoprotein. Dalam matriks terdapat enzim-enzim dan koenzim yang dibutuhkan untuk metabolisme energi. Di dalam mitokondria terdapat DNA dan ribosom.

Pada bab sebelumnya dijelaskan mengenai fotosintesis yang melibatkan organel sel yaitu kloroplas. Secara umum, fotosintesis adalah proses menangkap energi matahari untuk sintesis molekul-molekul organik kaya energi dari prekursor anorganik yaitu air ( $H_2O$ ) dan karbondioksida ( $CO_2$ ). Sementara respirasi adalah proses pembongkaran molekul-molekul organik dengan pembebasan energi yang tersimpan dalam zat sumber energi melalui proses kimia dengan menggunakan oksigen. Dari respirasi akan dihasilkan energi kimia ATP untuk kegiatan kehidupan, seperti sintesis (anabolisme), gerak, pertumbuhan dan perkembangan. Pada respirasi intraseluler melibatkan organel sel yaitu mitokondria (gambar 7.6).



Gambar 7.6.

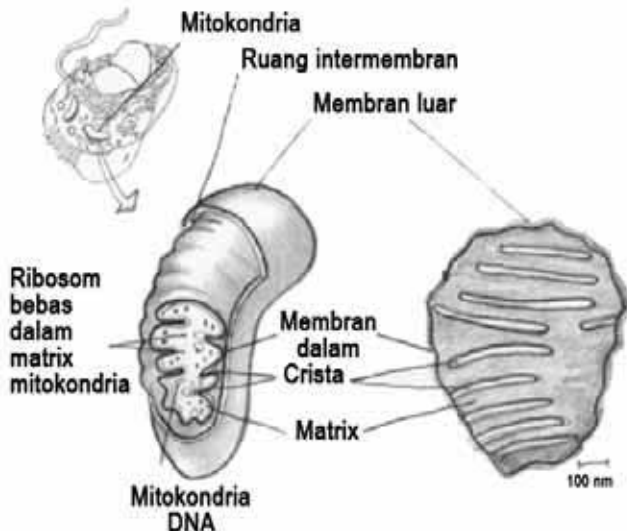
Hubungan antara Fotosintesis dan Respirasi Intraseluler  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## 2. Ultrastruktur Mitochondria

Mitochondria terdapat di dalam semua sel eukariotik dengan jumlah mitochondria pada sel tumbuhan lebih sedikit dibandingkan sel hewan. Pada umumnya berbentuk lonjong dengan ukuran mitochondria bervariasi, diameter 0,5–1  $\mu\text{m}$  dan panjang sampai 1  $\mu\text{m}$ . Jumlahnya lebih banyak pada sel yang memerlukan banyak energi, seperti sel otot jantung dan flagel sperma. Mitochondria memiliki dua sistem membran yaitu membran luar (*outer membrane*) dan membran dalam (*inner membrane*). Antara membran terdapat

ruang antar membran (*intermembrane*). Membran luar dan membran dalam berbeda ketebalannya. Membran luar memiliki ketebalan 6 nm sedangkan membran dalam dengan ketebalan 6-8 nm. Membran luar mengelilingi struktur mitokondria secara keseluruhan. Memiliki protein integral pada membran membentuk saluran untuk fasilitasi berbagai molekul ke luar masuk mitokondria.

Membran dalam mengelilingi matriks berisi cairan membentuk lekukan ke dalam matriks yaitu krista (gambar 7.7). Membran dalam mengandung 5 protein integral membran yaitu NADH dehidrogenase, Suksinat dehidrogenase, Sitokrom c reduktase, Sitokrom c oksidase. Mitokondria memiliki DNA sendiri dan ribosom, dapat membuat protein sendiri.

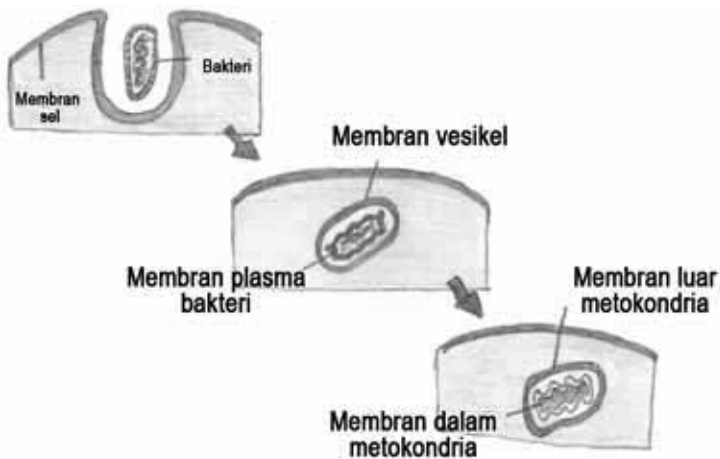


**Gambar 7.7.** Mitokondria, tempat respirasi seluler (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

DNA mitokondria berbentuk sirkular terdapat di matriks mitokondria (gambar 7.8). Meskipun memiliki genom sendiri, kebanyakan protein mitokondria dikode di nukleus, disintesis di sitoplasma dan ditranspor ke mitokondria.

### Hipotesis Endosimbiosis

Menurut Lynn Margulis ( 1970 ) : *The Origin of Eukaryotic Cells (Asal Usul Sel-Sel Eukariotik)* mitokondria berasal dari prokariot purba berfusi ke dalam sel eukariot tanaman dewasa modern (gambar 7.8).



Gambar 7.8. Endosimbiosis Mitokondria  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

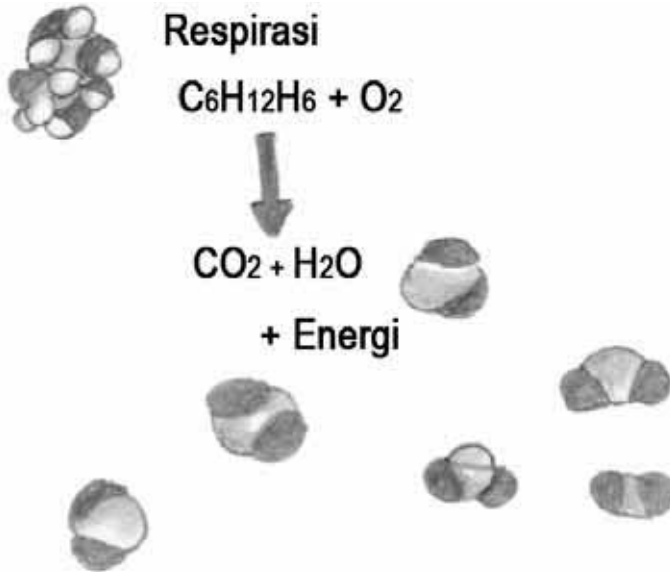
### 3. Fungsi Mitokondria

Mitokondria berfungsi dalam pengubahan energi potensial dalam bentuk makanan menjadi ATP (gambar 7.9). Tempat terjadinya metabolisme oksidatif (Respirasi Seluler). Jalur metabolisme memanen menghasilkan energi. Istilah respirasi secara umum adalah bernafas yaitu pertukaran  $O_2$  dan  $CO_2$  antara organisme dan lingkungannya. Sementara respirasi selular yaitu pemanenan/proses menghasilkan energi secara aerobik (perlu  $O_2$ ) dari molekul makanan oleh sel. Sebenarnya, pernafasan dan respirasi seluler sangat berhubungan. Reaksi respirasi disajikan pada gambar 7.10.



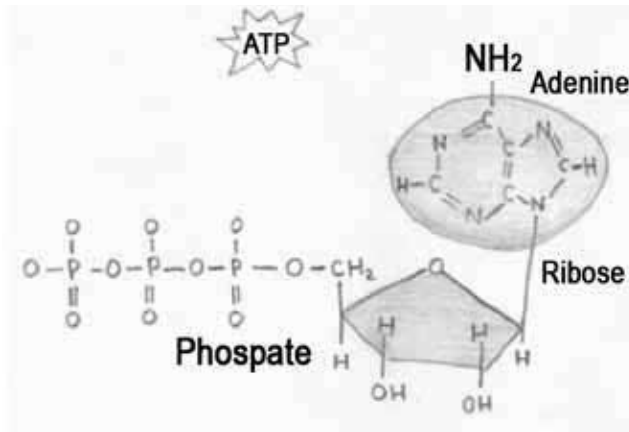
**Gambar 7.9.** Perombakan Makanan untuk Menghasilkan ATP dalam Proses Respirasi (Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)





**Gambar 7.10.** Reaksi Respirasi  
(Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

Pada respirasi terjadi perubahan bentuk energi dari senyawa organik menjadi anorganik untuk menghasilkan energi dan senyawa pembangun. Energi dalam bentuk ATP (adenosine triphosphate) yaitu molekul organik mengandung rantai fosfat berenergi tinggi (gambar 7.11).



**Gambar 7.11.** Struktur Kimia ATP  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

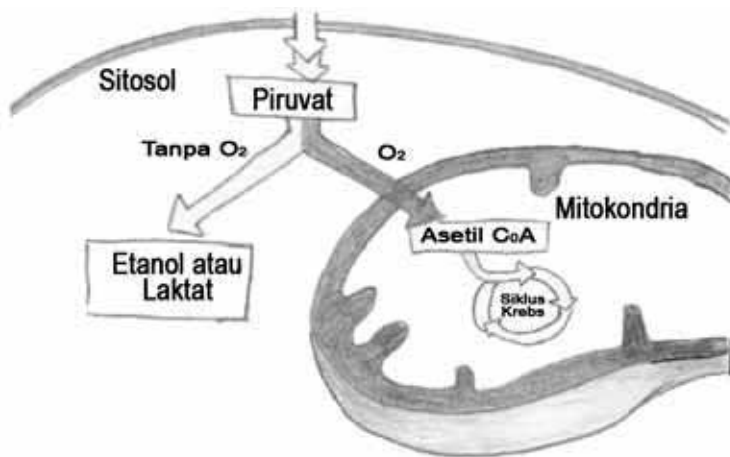
Tipe jalur metabolisme yang menghasilkan energi yaitu respirasi aerobik dan anaerob.

### 1. Respirasi aerobik

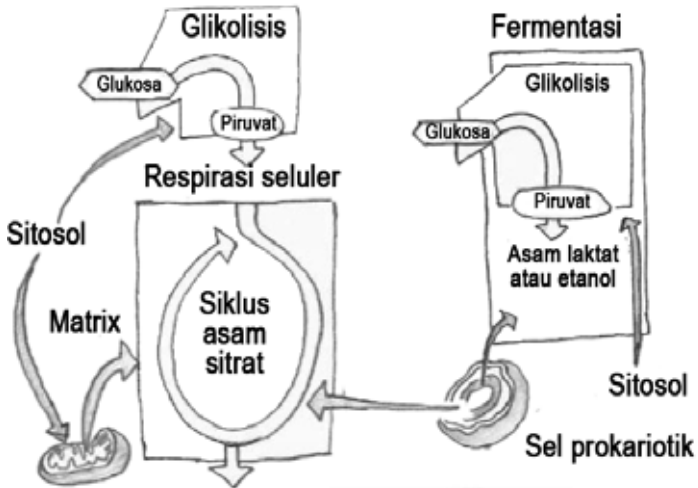
Tipe yang paling umum terjadi dalam sel dan merupakan jalur utama penghasil energi yang menghasilkan ATP (pembentukan ATP), molekul energi biologi. Istilah aerobik menunjukkan makna bahwa jalur aerobik tidak dapat berlangsung tanpa tersedianya oksigen yang cukup. Setiap pernafasan, memasukkan oksigen yang diperlukan sel untuk melangsungkan jalur aerobik ini. Respirasi aerobik adalah jalur yang paling banyak menghasilkan energi ATP dari satu molekul glukosa yaitu dapat dihasilkan 36 bahkan lebih molekul ATP. Pada jalur aerob terjadi di mitokondria dengan oksigen adalah penerima elektron terakhir yang dilepaskan selama proses reaksi.

## 2. Jalur anaerob (fermentasi)

Kebanyakan bakteri dan protista lain dengan jalur anaerob untuk membuat menghasilkan ATP yang diperlukannya. Jalur anaerob adalah sitoplasma sel dan substansi selain oksigen dalam sitoplasma adalah penerima elektron terakhir. Dalam ketiga jalur tersebut, reaksi tidak dapat berlangsung sendiri, tetapi harus dibantu enzim. Bila lewat jalur fermentasi satu molekul glukosa dihasilkan 2 ATP (gambar 7.12.).



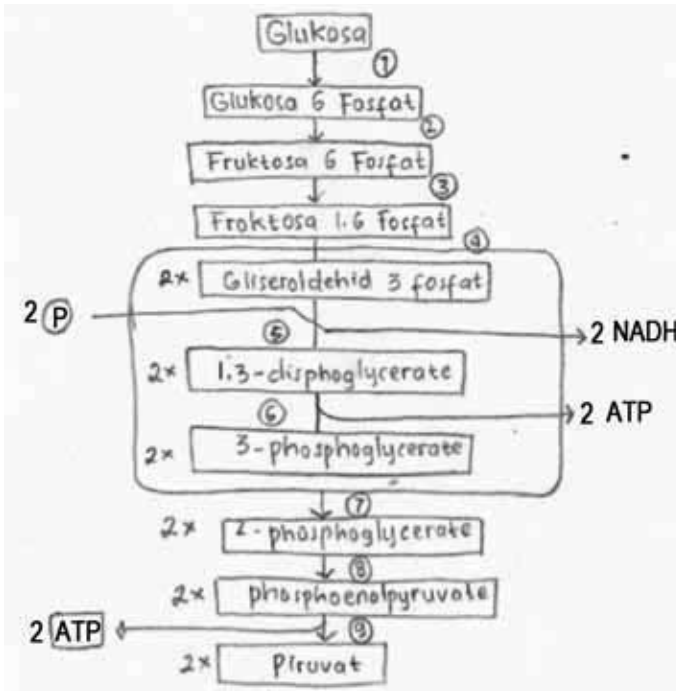
**Gambar 7.12.** Jalur Anaerobik dan Aerobik  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)



Gambar 7.13

Perbandingan antara Jalur Aerob dan Jalur An aerob  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Berikut adalah tahapan dalam respirasi sel : glikolisis, siklus Krebs/Asam Sitrat, dan transfer elektron/fosforilasi oksidatif. Ketiga tipe jalur metabolisme penghasil energi tersebut memulai prosesnya disebut reaksi glikolisis. Reaksi glikolisis memecah glukosa menjadi dua molekul asam piruvat, reaksi glikolisis terjadi dalam sitoplasma sel tanpa peranan oksigen. Setelah reaksi glikolisis jalur berikutnya bisa berbeda, bisa aerob bisa anaerob (gambar 7.14), tergantung kebutuhan sel dan atau ketersediaan oksigen dalam sel.



Gambar 7.14. Jalur Glikolisis

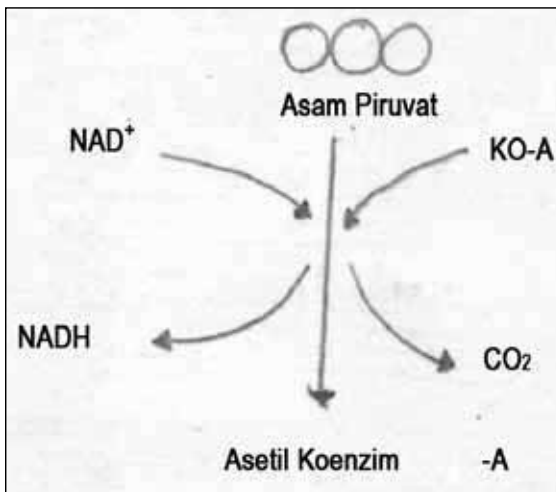
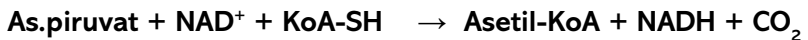
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

**Keterangan Gambar 7.14:**

1. Glukosa masuk sel, difosforilasi oleh enzim heksokinase, yang mentransfer gugus fosfat dari ATP ke gula
2. Glukosa 6-fosfat disusun ulang untuk mengubahnya menjadi isomernya, fruktosa 6-fosfat
3. Molekul ATP masih diinvestasikan dalam glikolisis. Enzim mentransfer gugus fosfat dari ATP ke gula
4. Enzim menguraikan molekul gula menjadi 2 gula berkarbon 3 yang berbeda: gliseraldehida fosfat & dihidroksiaseton fosfat

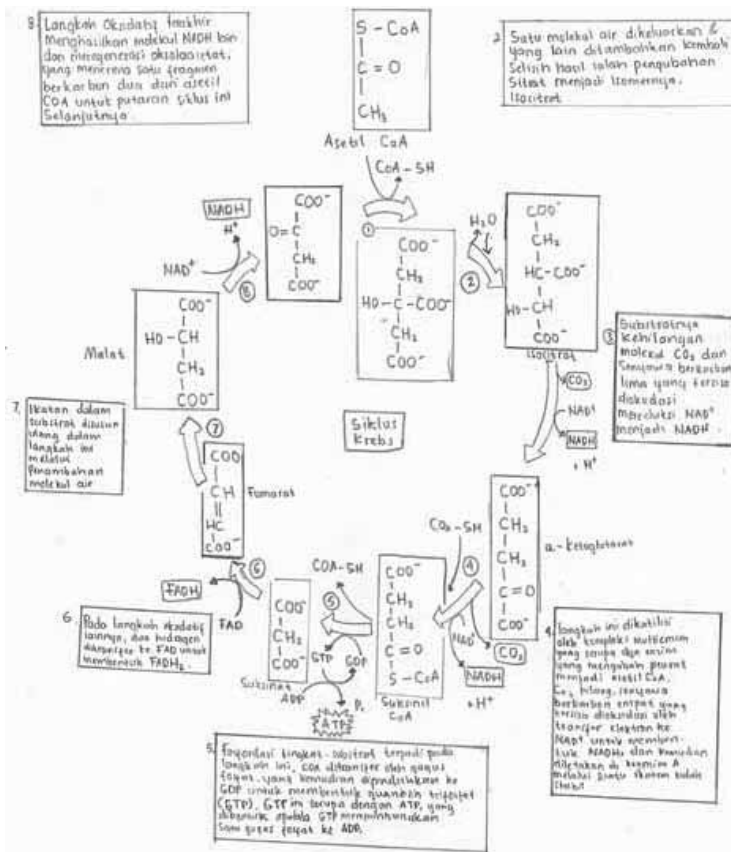
5. Suatu enzim mengkatalisis dua reaksi berurutan, enzim mengikat gliseraldehida fosfat dalam tempat aktifnya. Gula dioksidasi oleh transfer elektron dari  $H^+$  ke  $NAD^+$  membentuk NADH
6. Glikolisis menghasilkan sejumlah ATP
7. Enzim merelokasi gugus fosfat yang tersisa. Hal ini mempersiapkan substrat untuk reaksi berikutnya
8. Enzim membentuk ikatan ganda dalam substrat dengan cara mengekstrasi suatu molekul air membentuk PEP
9. Menghasilkan ATP, transfer gugus fosfat dari PEP ke ADP. Glukosa dipecah dan dioksidasi menjadi 2 molekul piruvat

Dekarboksilasi Oksidatif terjadi di matriks mitokondria, persiapan sebelum siklus Krebs yaitu (gambar 7.15.) :



**Gambar 7.15**  
Proses Pembentukan Asam Piruvat (Hasil Glikolisis) menjadi Asetil Koenzim A (Persiapan Sebelum Siklus Krebs) (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis).

Siklus Krebs terjadi di matriks mitokondria dengan menghasilkan 3 NADH & FADH<sub>2</sub>. Elektron dari NADH & FADH<sub>2</sub> ditransfer ke elektron carrier. Terjadi pada membran dalam mitokondria. Akseptor elektron O<sub>2</sub> akan direduksi dan membentuk H<sub>2</sub>O. Pergerakan proton kembali melewati membran oleh ATP-sintase. Oksidasi asetil CoA menjadi CO<sub>2</sub> (gambar 7.16).



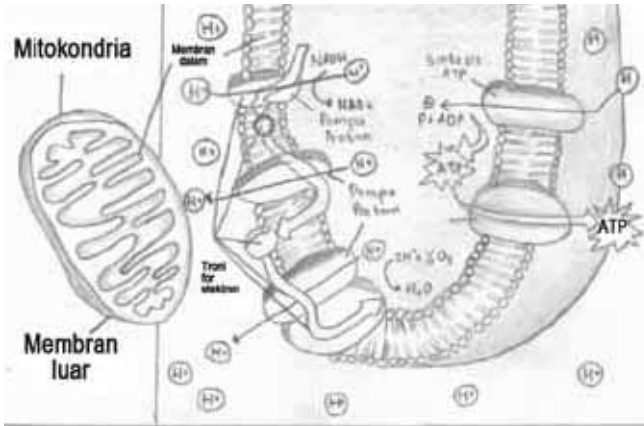
Gambar 7.16. Siklus Krebs

(Campbell, et al., 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

**Keterangan Gambar :**

1. Asetil CoA menambahkan fragmen berkarbon-2 ke oksaloasetat. Ikatan tidak stabil asetil CoA dipecah begitu oksaloasetat memindahkan koenzim tersebut dan terikat ke gugus asetil. Hasilnya sitrat berkarbon-6
2. Satu molekul air dikeluarkan dan yang lain ditambahkan kembali. Selisih hasil ialah perubahan sitrat menjadi isomernya, isositrat
3. Substratnya kehilangan molekul  $\text{CO}_2$  dan senyawa berkarbon-5 yang tersisa dioksidasi, mereduksi  $\text{NAD}^+$  menjadi NADH
4. Dikatalisis oleh kompleks multienzim, mengubah piruvat menjadi asetil CoA,  $\text{CO}_2$  hilang, senyawa carbon 4 yang tersisa dioksidasi oleh transfer elektron ke  $\text{NAD}^+$  membentuk NADH
5. Fosforilasi tingkat substrat. CoA ditransfer oleh gugus fosfat yang dipindahkan ke GDP membentuk GTP
6. Dua hidrogen ditransfer ke FAD untuk membentuk  $\text{FADH}_2$
7. Ikatan dalam substrat disusun ulang melalui penambahan air
8. Langkah oksidatif terakhir, menghasilkan molekul NADH & meregenerasi oksaloasetat, menerima satu fragmen berkarbon dua dari asetil CoA untuk putaran selanjutnya

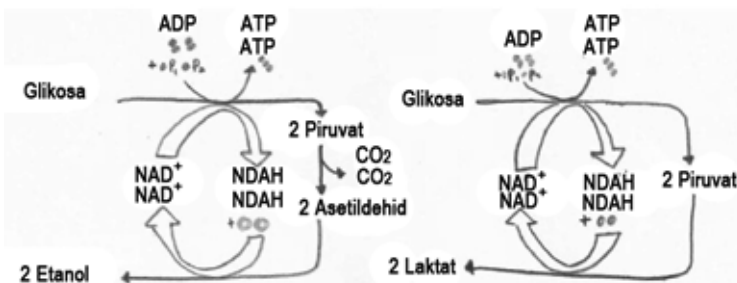




**Gambar 7.17.** Transpor Elektron  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis).

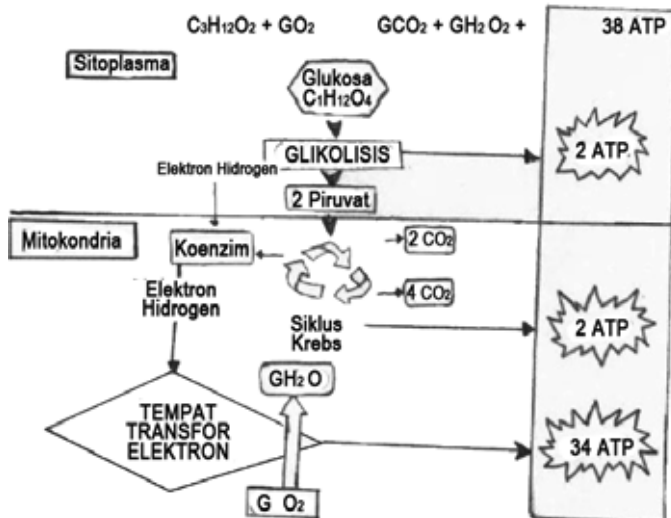
Transfer elektron/fosforilasi oksidatif, terjadi di membran kista menyebabkan terjadinya gradien proton untuk sintesis ATP oleh ATP-sintase (Gambar 7.17). Dari molekul NADH dan  $FADH_2$  membutuhkan  $O_2$ .

Fosforilasi oksidatif dengan memanfaatkan kompleks enzim respirasi pada membran dalam mitokondria. Pada kondisi an aerob maka asam piruvat masuk ke jalur Fermentasi alkohol dan Fermentasi Asam Laktat (Gambar 7.18).



**Gambar 7.18** Jalur Respirasi An Aerob  
(Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis)

Secara umum untuk respirasi seluler disajikan pada gambar 7.19 dan 7.20 di bawah ini.



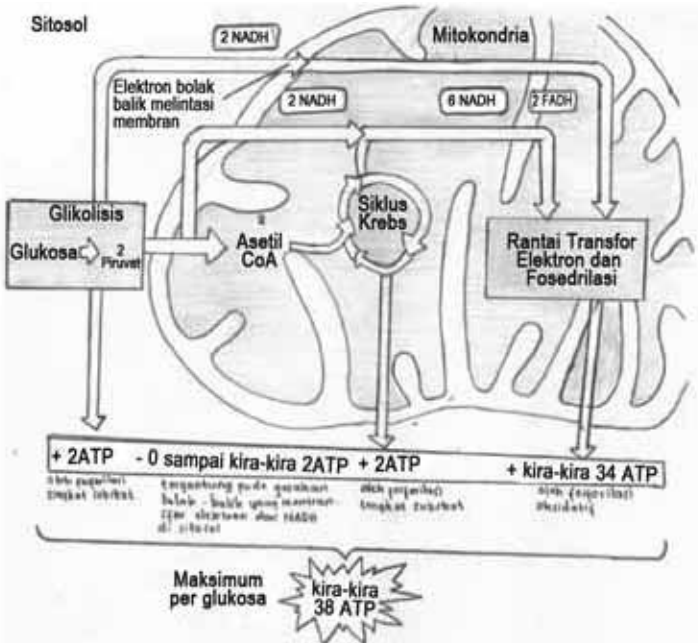
**Gambar 7.19**

Tahap-tahap Respirasi Seluler

(Campbell, *et al.*, 2002. Gambar ulang oleh Penulis).

**Tabel 4.1.** Proses dan Tempat Terjadi Respirasi

No	PROSES	TEMPAT
1	Glikolisis	Sitosol
2	Dekarboksilasi oksidatif	Matriks mitokondria
3	Siklus Krebs	Matriks mitokondria, kecuali dehidrogenasi suksinat
4	Transfer elektron	Membran dalam mitokondria
5	Fosforilasi oksidatif	Membran dalam mitokondria



**Gambar 7.20.** Tahap Respirasi Seluler dan Tempat Terjadinya (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

#### 4. Pertanyaan Diskusi

- 1) Mengapa mitokondria dikatakan sebagai organel pembangkit tenaga?
- 2) Gambarkan struktur mitokondria dan sebutkan struktur yang berperan dalam respirasi!
- 3) Jelaskan tahap-tahap respirasi seluler termasuk jumlah energi ATP yang dihasilkan!
- 4) Apakah yang dimaksud dengan pompa proton?
- 5) Apabila ketersediaan oksigen kurang maka apa yang terjadi pada respirasi seluler?

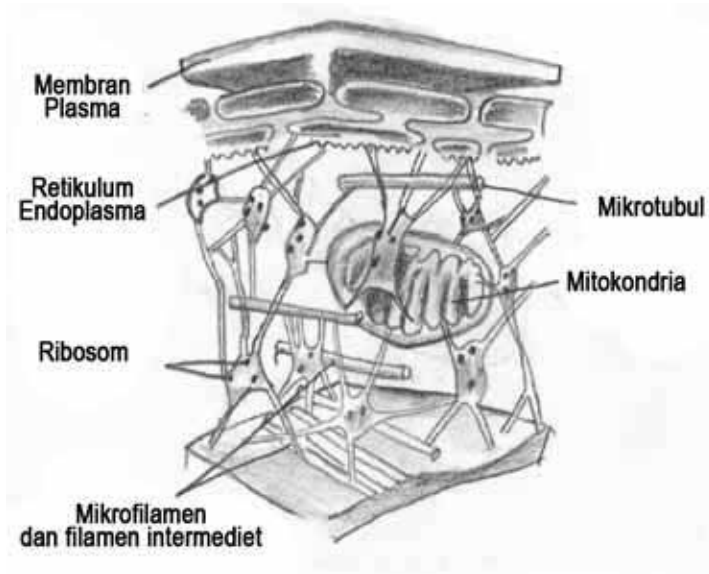


## Bab VIII

# Sitosol dan Sitoskeleton

### A. Pendahuluan

Bagian sitoplasma yang berupa cairan yang terdapat di sela-sela organel berselaput disebut sitosol. Beribu-ribu jenis enzim yang terlibat dalam proses metabolisme intermedia terlarut di dalam sitosol, cairan ini penuh dengan ribosom yang aktif mensintesis protein. Dan lima puluh persen protein yang disintesis oleh ribosom ini harus tetap berada di sitosol. Protein yang berada di sitosol, sebagian berbentuk benang-benang halus yang disebut filamen. Filamen-filamen ini teranyam membentuk suatu jejala atau rerangka yang disebut sitoskelet.



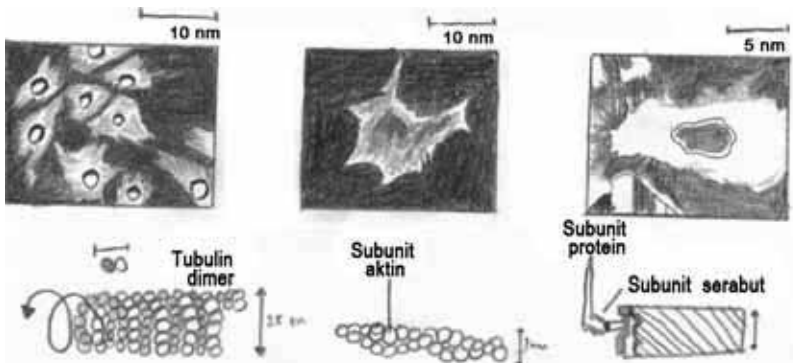
**Gambar. 8.1** Kerangka sel beserta komponen-komponennya (Bruce Albert, 1994)

Seorang ilmuwan bernama Keith Porter dan sejawatnya berhasil melihat sel dengan menggunakan teknik HVEM (High Voltage Electron Microscope) yaitu suatu cara untuk melihat sel tanpa penyelubungan (*embedding*). Pengamatan dengan HVEM menunjukkan bahwa bagian sitoplasma yang berada di sela-sela organel tampak penuh dengan anyaman trimatra dari benang-benang protein yang sangat halus. Anyaman ini disebut dengan filamen yang membentuk jala-jala mikrotrabekula karena mirip trabekula duri bunga karang. Dalam perkembangannya dan karena anyaman tadi terdapat dalam sitosol serta membentuk kerangka sel maka mikrotrabekula ini kemudian dikenal dengan nama sitoskeleton (*cyto* = sel dan *skeleton* = rangka).

## B. Komponen Penyusun Sitoskeleton

Untuk mempermudah membandingkan tiga jenis sitoskeleton disajikan pada gambar 8.2 di bawah ini.

SIFAT	MIKROTOBULA	MIKROFILAMEN (FILAMEN AKTIN)	FILAMEN INTERMEDIET
Struktur	Tabung berongga, dindingnya terdiri atas 13 kolom molekul tubulin	Dua untai aktin yang saling terjalin	Protein serabut menggulus menjadi kabel yang lebih tebal
Diameter	25 nm dengan lumen 15-nm	7 nm	8 – 12 nm
Subunit Protein	Tubulin yang terdiri atas $\alpha$ -tubulin dan $\beta$ tubulin	Aktin	Salah satu dari beberapa protein yang berbeda pada keluarga keratin yang tergantung pada jenis sel
Fungsi	Mempertahankan bentuk sel ("balok" penahan - tarikan) Motilitas sel (seperti pada silia atau flagela) Pergerakan kromosom dalam pembelahan sel Pergerakan organel	Mempertahankan bentuk sel (unsur penahan - tarikan) Perubahan bentuk sel Kontraksi otot Pengaliran sitoplasma Motilitas sel (seperti pada pseudopodia) Pembelahan sel (pembentukan alur pembelahan)	Mempertahankan bentuk sel (unsur penahan - tarikan) Tempat bertautnya nukleus dan organel tertentu lainnya Pembentukan lamina nukleus



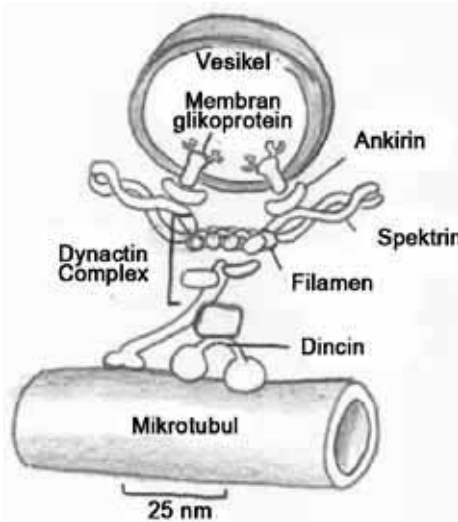
**Gambar 8.2.** Perbandingan Tiga Jenis Sitoskeleton (Becker W.M et. al., 2000. Gambar ulang oleh Penulis)

Sitoskeleton berfungsi memberi bentuk kepada sel, mengatur dan menimbulkan gerakan sitoplasma yang beruntun, dan berkaitan dalam membentuk jejaring kerja yang membantu reaksi-reaksi enzimatik.

Berdasarkan struktur dan garis tengahnya sitoskeleton dikelompokkan menjadi tiga kelompok, yaitu: filamen intermediate (diameter 8-10 nm), mikrotubul (diameter 24 nm), mikrofilamen (diameter 60), ketiganya merupakan protein dinamis yang selalu terakit dan terurai (gambar 8.2).

Sitoskeleton berperan dalam pergerakan sel (motilitas sel). Motilitas mencakup perubahan tempat sel maupun pergerakan sel lebih terbatas. Sitoskeleton berinteraksi dengan protein disebut motor protein. Motor protein menggoyang silia dan flagela dan sel otot berkontraksi.

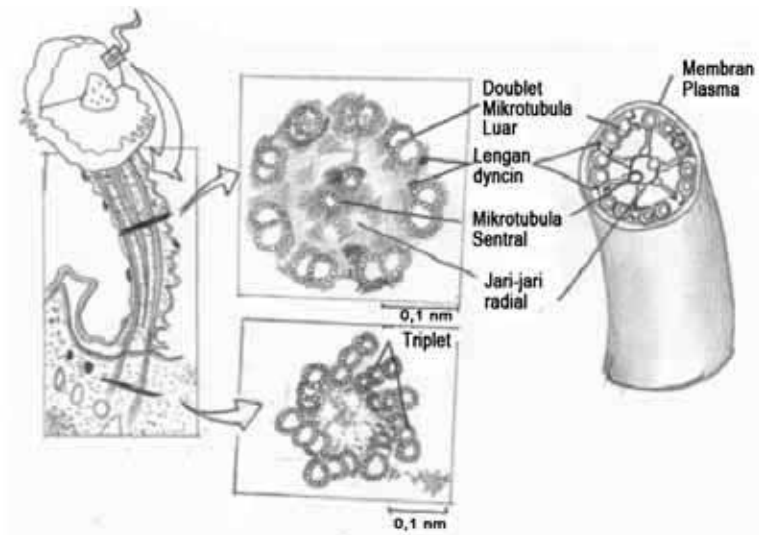
Molekul motor juga melekat pada reseptor organel-organel seperti vesikula sehingga membuat organel bisa “berjalan” di sepanjang mikrotubul (gambar 8.3). Misalnya: vesikula (mengandung neurotransmitter berpindah ke ujung akson, pemanjangan sel saraf yang melepas molekul transmitter sebagai sinyal kimia ke sel saraf berikutnya).



**Gambar 8.3.**  
Protein Kinesin yang bergerak di Sepanjang Mikrotubul  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

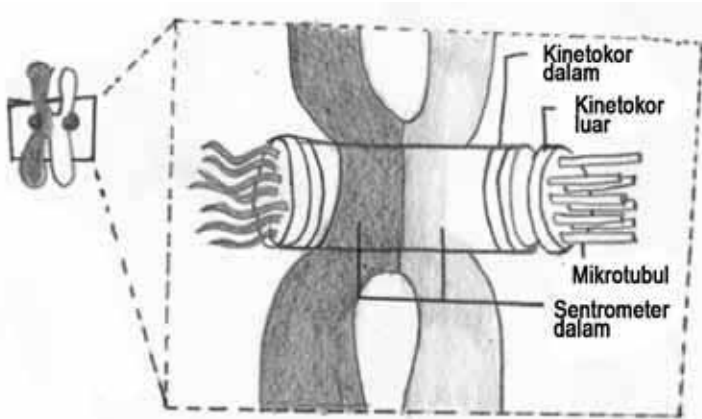
## 1. Mikrotubul

Mikrotubul tumbuh dari sentrosom. Sentrosom sel hewan terdapat sepasang sentriol, masing-masing tersusun ke dalam suatu cincin. Apabila sel membelah, sentriol bereplikasi. Mikrotubul sitoplasma berfungsi membantu gerakan sel pada silia dan flagella (gambar 8.4), dan membantu bidang pembelahan dalam pembentukan sel (gambar 8.5).



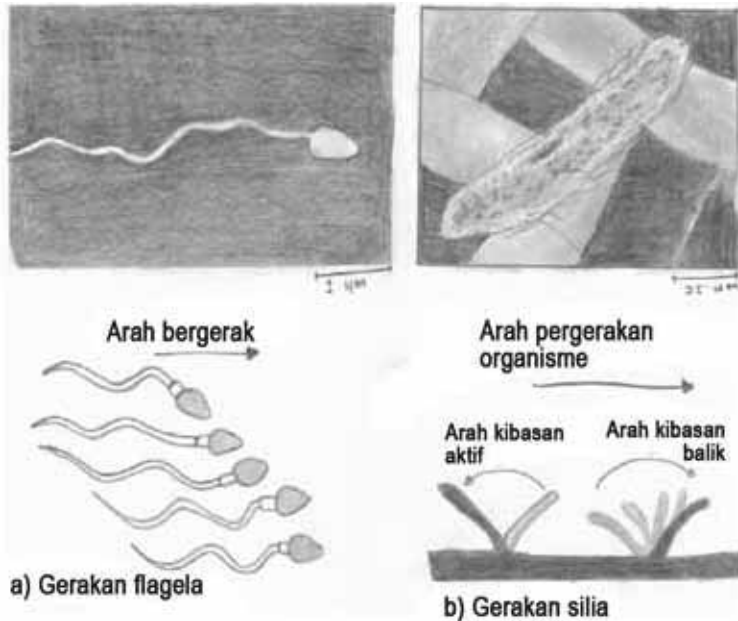
**Gambar 8.4.** Mikrotubul pada Flagela Sel Hewan (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)





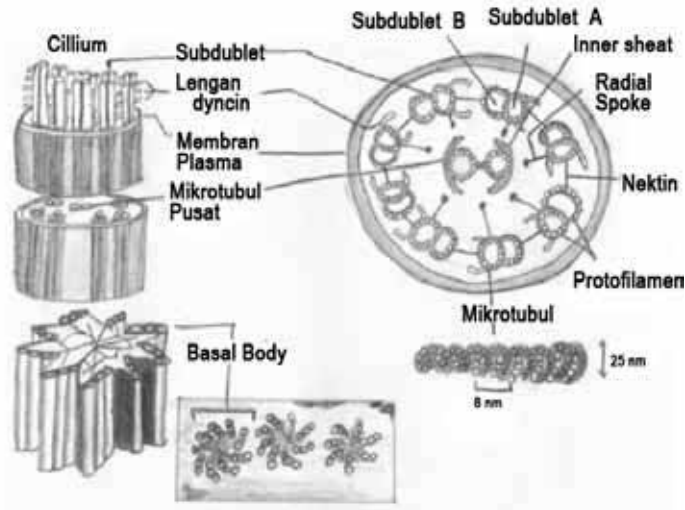
**Gambar 8.5.** Mikrotubul pada Bidang Pembelahan Sel  
(Becker W.M. et al, 2000. Gambar ulang oleh Penulis)

Silia biasanya muncul dalam jumlah banyak di permukaan sel. Diameter 0,25  $\mu\text{m}$  dan panjang 2-20  $\mu\text{m}$ . Misalnya ditemukan di lapisan batang tenggorokan yang bersilia menggerakkan lendir untuk menangkap kotoran. Jumlah flagela biasanya terbatas satu atau beberapa untuk setiap sel. Flagela berdiameter sama tetapi lebih panjang, ukurannya 10-200  $\mu\text{m}$ . Flagela dan silia berbeda dalam pola kibasannya. Flagela berombak, menghasilkan gaya searah dengan sumbu flagela. Silia seperti dayung, tegak lurus searah sumbu silia (gambar 8.6).



**Gambar 8.6.** Gerakan Silia dan Flagela  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

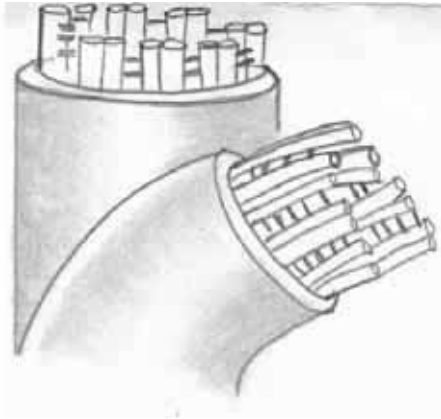
Silia dan flagela memiliki suatu inti yang terdiri dari mikrotubul diselimuti oleh suatu membran yang memanjang. Sembilan doublet mikrotubul di tengah cincin terdapat dua mikrotubul tunggal. Susunan ini sebagai pola “9 + 2” (gambar 8.7).



**Gambar 8.7.**

Mikrograf elektron penampang melintang flagela  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

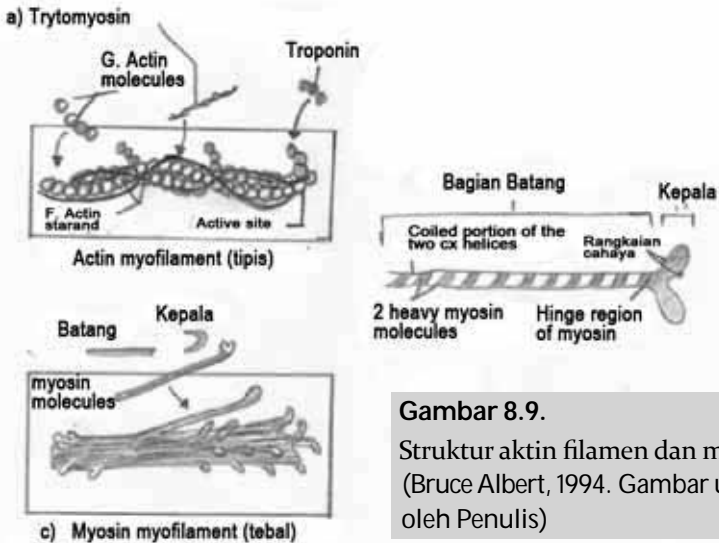
Lengan memanjang dari tiap doublet mikrotubul ke doublet berikutnya merupakan motor yang bertanggungjawab untuk gerakan membelok silia dan flagela. Molekul motor yang membangun lengan disebut dynein. Lengan dynein melakukan siklus pergerakan yang rumit disebabkan oleh perubahan-perubahan konformasi protein yang digerakan oleh ATP. Doublet tidak dapat meluncur jauh karena doublet secara fisik ditahan dalam silia. Tindakan lengan dynein menyebabkan doublet membengkok (gambar 8.8).



**Gambar 8.8.** Lengan dynein membengkok (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## 2. Mikrofilamen

Mikrofilamen merupakan batang padat diameter 7 nm disebut juga filamen aktin karena tersusun dari molekul aktin (gambar 8.9).



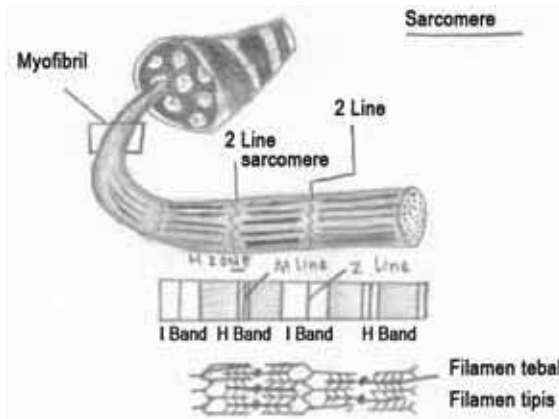
**Gambar 8.9.** Struktur aktin filamen dan miosin (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Aktin berupa protein globular yang berperan dalam menahan tegangan (gaya tarik). Mikrofilamen yang bergabung dengan protein lain, membentuk jalinan tiga-dimensi dalam plasma membran membantu dukungan bentuk sel. Kondisi tersebut menyebabkan kontraksi sel otot. Ribuan filamen aktin disusun sejajar satu sama lain di sepanjang sel otot diselingi dengan filamen yang lebih tebal terbentuk dari protein disebut miosin (gambar 8.9 dan 8.10).



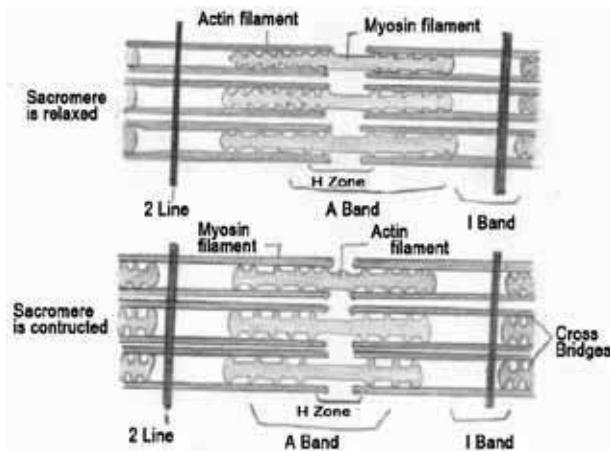
**Gambar 8.10.** Pergerakan miosin pada kontraksi sel otot (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Filamen aktin merupakan komponen utama penyusun filamen tipis pada serabut otot (gambar 8.11).



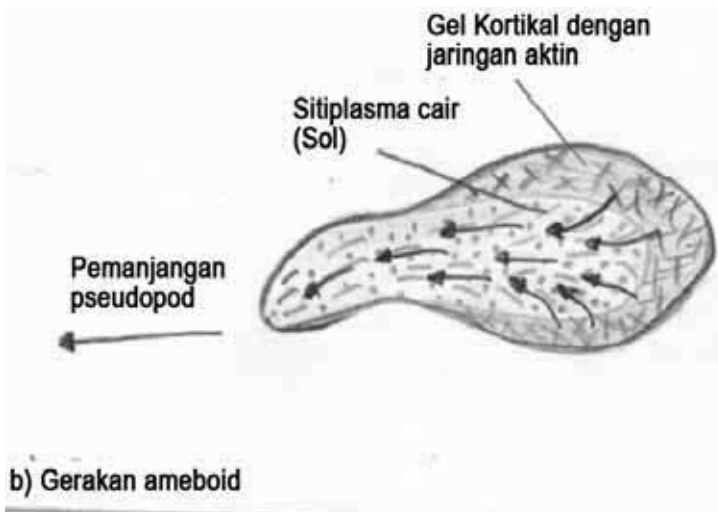
**Gambar 8.11**  
Sel otot  
(Dokumen Penulis)

Kontraksi sel otot berupa *sliding filamen*. Pada saat relaksasi kepala miosin tidak melekat pada filamen aktin. Pada saat kontraksi menyebabkan kepala miosin melekat pada filamen aktin. Kepala miosin mendorong filamen aktin ke arah tengah sarkomer (zona H) sehingga sarkomer memendek (gambar 8.12).



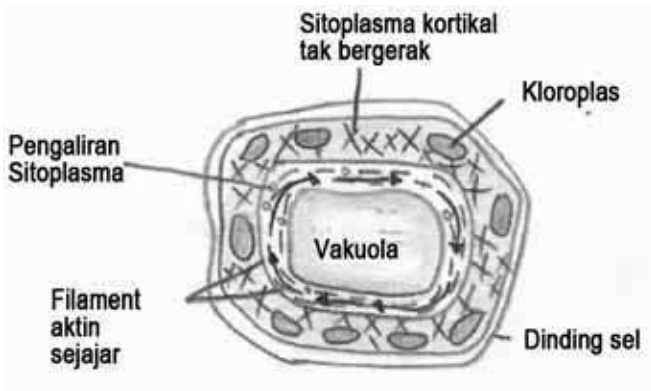
**Gambar 8.12.** Relaksasi dan kontraksi sel otot  
(Dokumen Penulis)

Gerakan aktin-miosin memainkan peran gerakan amuboid. Pseudopodia memanjang dan berkontraksi melalui penyusunan reversible dari sub unit aktin menjadi mikrofilaran, dan dari mikrofilaran menjadi jalinan mengubah sitoplasma dari bentuk sol (larutan koloid yang berbentuk cair) ke bentuk gel (gambar 8.13). Pada sel tumbuhan, interaksi aktin-miosin dan transformasi sol ke gel disebabkan oleh aktin dalam aliran sitoplasma untuk pendistribusian materi dalam sel (gambar 8.14).



**Gambar 8.13 Gerakan Amuboid**

Interaksi filamen aktin dengan miosin di ujung sel yang tertinggal di belakang (sebelah kanan) menekan sitoplasma interior sel yang lebih cair sehingga maju (ke kiri) memasuki pseudopodia. (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)



**Gambar 8.14. Gerakan Sitosol dalam sel tumbuhan.**

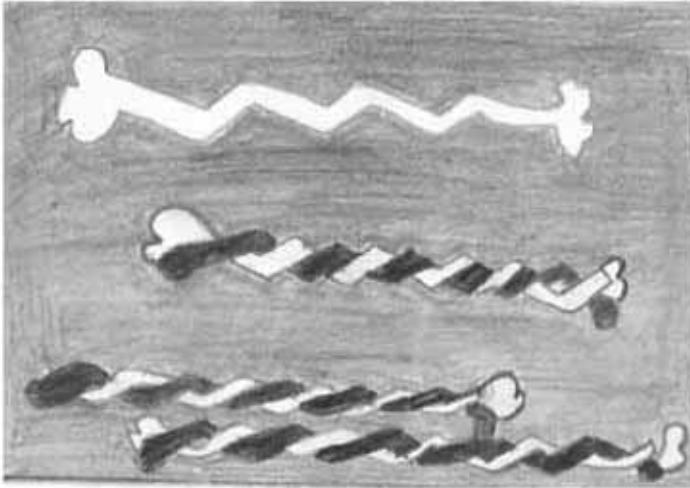
Selapis sitosol beredar mengelilingi sel, bergerak di atas 'karpet' dari filamen-filamen aktin yang paralel. Motor miosin yang melekat ke organel-organel dalam sitosol cair mungkin menggerakkan aliran ini melalui interaksi dengan aktin.

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

### 3. Filamen Intermedia

Filamen intermedia bersifat kenyal, memiliki daya rentang yang sangat tinggi, merupakan benang berongga terdiri dari lima protofilamen dan terdapat pada sel eukariotik (gambar 8.15). Filamen intermedia banyak dijumpai di sekitar inti, menjulur ke arah perifer sel. Filamen intermedia banyak terdapat di dalam sel yang mengalami stress mekanik misalnya di epitelium, akson sel saraf, dan otot polos.





**Gambar 8.15.** Filamen Intermedia (Dokumen Penulis)

## C. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan apakah yang dimaksud dengan sitoskeleton berkaitan dengan struktur dan fungsinya bagi sel!
2. Jelaskan ciri-ciri mikrotubul dan fungsinya!
3. Jelaskan ciri-ciri mikrofilamen dan fungsinya!
4. Jelaskan ciri-ciri filamen intermedia dan fungsinya!
5. Bagaimana pergerakan Silia dan Flagela?

# Pelekatan Sel (*Cell Junction*)

## A. Pendahuluan

Sel-sel dalam jaringan dan organ seringkali ditemukan daerah membran plasma yang disebut *cell junction* (pertautan sel). Dengan adanya pertautan sel tersebut memungkinkan sel dapat melakukan berbagai fungsi dalam jaringan dan organ hewan.

Pertautan sel ini memungkinkan suatu jaringan berperan sebagai penghalang bagi perpindahan air, zat-zat terlarut dan sel dari kompartemen yang satu ke kompartemen yang lainnya. Pertautan antar sel (sering diartikan sebagai hubungan sel atau komunikasi antar sel) paling banyak dan sangat penting terutama bagi jaringan epitelium. Pertautan antar sel dan pertautan matriks sel pada jaringan pengikat ini sangat kecil sehingga tidak terlihat dengan pengamatan mikroskop cahaya. Dan hanya dengan menggunakan mikroskop elektron dan metode *freeze fracture* (pengelupasan beku) pertautan sel dapat diamati dengan jelas.

Dari mikrograf elektron tersebut terlihat bahwa selaput sel di tempat pertautan tersebut menunjukkan struktur yang sangat khas. Berdasarkan fungsinya pertautan antar sel dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok, yaitu:

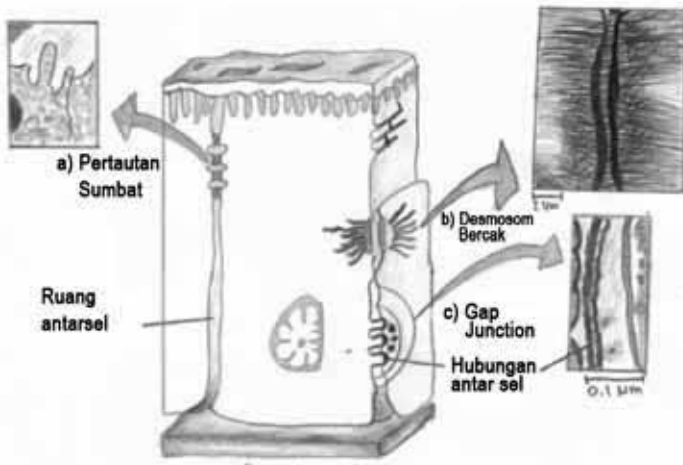
1. *Sealing junction/* pertautan penyumbat (*occluding junction/tight junction*), suatu pertautan sel yang merekatkan selaput beberapa buah sel epitelium yang berdampingan sehingga menghalangi menelusupnya molekul-molekul dari satu sisi jaringan epitelium ke sisi yang berlawanan (lumen ke basal atau sebaliknya).
2. *Adhesive junction/* pertautan penambat (*anchoring junction*), suatu pertautan yang secara mekanik menempelkan satu sel ke sel tetangganya atau ke matriks.
3. *Communication junction/* pertautan penghubung (terdapat pula *gap junction/* pertautan celah dan *plasmodesmata*), suatu pertautan yang memungkinkan lewatnya zat-zat kimia atau isyarat elektrik dari sel yang satu ke sel tetangga yang terdekat.

## B. Struktur Pelekatan Sel

### 1. Pertautan Sumbat (*Sealing Junction /Tight Junction*)

Di dalam *sealing junction* terdapat pertautan sel yang disebut *tight junction* (gambar 9.1). Membran plasma dari dua sel yang membentuk *junction*, melebur bersama-sama sehingga tertutup tidak ada tempat ekstraseluler yang dapat dilihat. Pada tempat-tempat yang ada *junction* rapat, total luas dari 2 membran yang membentuk *junction* ternyata

kadang-kadang kurang dari ketebalan 2 membran yang ditempatkan secara berdampingan pengaruhnya bahwa lapisan yang paling luar (fosfolipid) membran-membran bersambung menjadi satu bilayer (kesatuan dari 2 lapisan) pada ujung-ujung junction pengaruh ini dikuatkan oleh munculnya junction rapat pada perlakuan *freeze fracture* (pengelupasan beku) *tight junction*, yang menunjukkan sebuah jaring daerah yang memungkinkan membran sel membentuk *junction* yang secara aktual menyatu secara bersama-sama (gambar 9.1).



**Gambar 9.1.** Skema beberapa jenis pertautan antar sel dan kedudukannya (Thorpe, 1984. Gambar ulang oleh Penulis)

*Sealing junction* (pertautan sumbat) berbentuk lingkaran penuh mengelilingi sel melapisi rongga dan pembuluh, seperti lapisan sel yang melapisi pembuluh dalam liver. *Sealing junction* ini ditunjukkan dalam percobaan oleh Daniel A. Goodenough dan Jean Paul Revel di Harvard University,

mereka memasukan zat warna ke dalam pembuluh darah yang memenuhi jaringan liver. Zat warna tersebut dibocorkan dari pembuluh darah ke tempat-tempat diantara sel, di tempat itulah zat warna dapat dideteksi dengan mikroskop elektron.

Bagaimanapun zat warna telah memancar hanya ke dalam ruang ekstraseluler menuju batas pembuluh lapisan sel di dalam liver sampai disitu dihentikan oleh *sealing junction*. Sebagai tambahan terhadap fungsinya dalam menutup batas-batas pembuluh di dalam organ, *sealing junction* ditemukan di tepi sel yang melapisi sistem pencernaan. *Sealing junction* juga muncul diantara kapiler aliran darah di dalam tempat-tempat tertentu seperti otak yang merupakan rintangan yang terpelihara pada campuran yang lengkap dari darah dan cairan ekstraseluler. Di beberapa tempat seperti pada lapisan sel kandung kemih, *sealing junction* diduga sebagai partikel pencegah yang sekecil ion yang menyebar dari cairan kandung kemih ke dalam ruang-ruang diantara sel.

Menurut Issoegianti *sealing junction* disebut sebagai pertautan penyumbat. Suatu pertautan yang merekatkan sedemikian rupa selaput beberapa buah sel epitel yang berdampingan, sehingga menghalangi menelusupnya molekul-molekul dari satu sisi ke jaringan epitelium ke sisi yang berlawanan (dari lumen ke basal atau sebaliknya).

Jaringan epitelium memiliki fungsi umum yang sangat penting yaitu sebagai penghalang yang pemilih, memisahkan cairan yang berada di sebelahnyanya, yang berbeda susunan kimianya. Dalam hal ini pertautan sumbat, satu-satunya jenis pertautan penyumbat, memegang peranan ganda

yang sangat penting dalam mempertahankan fungsinya sebagai penghalang yang pemilih. Pertautan sumbat antar sel-sel epitelium merintangai perpindahan molekul protein selaput sel dan zat-zat kimia yang berada disebelah lapisan epitelium.

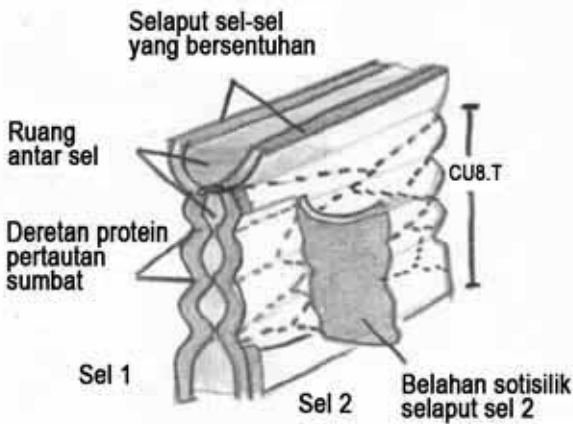
Mikrograf elektron pengelupasan beku dari lapisan epitelium menunjukkan pertautan sumbat terdiri dari untaian protein beranastomosis yang mengelilingi daerah apikal sel-sel epitelium. Pada transmisi mikroskop elektron terlihat sebagai deretan pusat persentuhan antara lembar luar selaput sel dari sel-sel bertautan. Permeabilitas pertautan sumbat terhadap molekul-molekul mikro sangat beragam, misalnya pertautan sumbat epitelium mukosa usus halus lebih mudah diselusupi oleh ion-ion dari pada pertautan sumbat membatasi lewat ion-ion melalui ruang antar sel sesuai dengan jumlah untaian di dalam anyaman, seakan-akan setiap untaian masing-masing berperan sebagai pembatas.

Pola penyebaran pertautan sumbat berbeda untuk setiap jenis epitelium. Pola ini sesuai fungsi jaringan epitelium tersebut. Gambar 9.2 menunjukkan beberapa pola anyaman pertautan sumbat. Untaian terdiri dari deretan panjang transmembran\_selaput-selaput sel yang saling berinteraksi dari dua buah sel yang berdampingan. Molekul-molekul protein ini bergabung satu dengan yang lain untuk menyumbat ruang antar sel.

Model pertautan sumbat (gambar 9.2):

- 1) Sumbat Junction ini terdiri atas deretan protein transmembran, yang saling berkaitan dari sel yang berdampingan.

- 2) Sumbat Junction di tempat pertautan, belahan ekstrasitoplasmik selaput sel A menyatu dengan yang dari sel B membentuk lembaran utuh yang bersambungan. Di pusat pertautan pospolida belahan ekstrasitoplasmik membentuk misel yang terbalik pada pertautan selaput sel misel tampak dari filamen aktin. Dari jaring-jaring ini juga terjulur berkas filamen aktin ke arah mikrovili.



**Gambar 9.2.** Dua model pertautan sumbat  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Model pertautan sumbat selaput sel dari sel A dan B diikat pada titik sentuh oleh deretan protein transmembran.

- a. Model pertautan sumbat, menunjukkan adanya misel terbalik pada titik sentuh.
- b. Pertautan Penambat (Adhesive Junction)

Tipe utama junction adhesive yang ditemukan pada hewan vertebrata dan invertebrata adalah desmosom (dari kata desmos yang artinya tali/ikatan). Di daerah desmosom benda membentuk ketebalan, lapisan tengah disebut plaque, tepat di bawah membran plasma dikedua bentuk sel junctions. Selain itu serat yang lebih ketengah terpancar dari plaque mengelilingi sitoplasma pada kedua sisi junction. Serat tengah yang disebut tonofilamen seperti membuang jangkar desmosom di dasar sitoplasma itu sebenarnya tijar dari tipe keratin. Keseluruhan yang kompleks memungkinkan seperti kancing bentuk lingkaran menjadi kasa atau memungkinkan terjadinya perluasan seperti biasa bisa berlanjut terputus seperti resleting ikat pinggang yang mengelilingi sel.

Desmosom tengah terjadi karena sel membuat ikatan untuk benda ekstraseluler seperti memperbanyak serat yang tersusun, desmosom tengah juga tampak mendekati membran plasma dalam sel yang tumbuh di dalam kultur jaringan dimana desmosom tengah menjauhi sel yang telah dikembangkan menuju lapisan bawah plastik/garis tempat desmosom tumbuh.

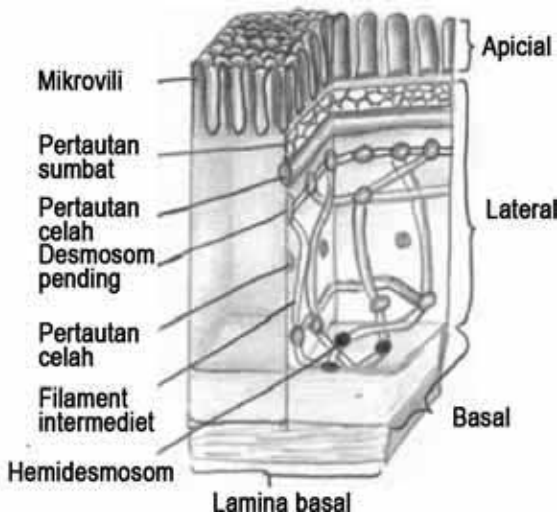
Zat ekstraseluler dari desmosom telah diidentifikasi sebagai karbohidrat dari glikoprotein membran pencernaan dan bersama dengan enzim-enzim menyerang protein lainnya atau karbohidrat menyebabkan sel-sel yang terikat oleh desmosom menjadi ambruk. Ini menunjukkan bahwa membran glikoprotein tanggap terhadap pertahanan struktur desmosom bersama-sama.

Desmosom diantara semua sel dalam jaringan hewan multiseluler, khususnya dalam jaringan yang selalu terdapat tekanan fisik seperti jaringan epitelia yang menutup permukaan hewan atau lapisan rongga tubuh.



Satu lagi *junction adhesive* yang tidak terorganisir yang disebut *adherens junction* juga terdapat diantara sel-sel hewan disamping desmosom dalam beberapa adhesive junction, serat-serat yang membawa junction ke dasar sitoplasma tampak lebih tipis daripada tonofilamen desmosom diidentifikasi sebagai aktin mikrofilamen. Kehadiran mikrofilamen yang bergabung dengan junction berpengaruh bahwa mikrofilamen dapat melayani motil sebagaimana fungsi *adhesive*.

Berkas filamen aktin berhubungan dengan jaring-jaring terminal (*terminal web*) yang juga terdiri dari filamen aktin. Jaring-jaring juga terjulur berkas filamen aktin ke arah mikrovili (gambar 9.3). Selain itu berkas filamen aktin juga berikatan dengan protein pengikat intrasel yang berikatan dengan glikoprotein transmembran dengan demikian sel-sel jaringan epitelium saling berkaitan dengan erat. Berkas-berkas aktin ini diduga berperan dalam proses morfogenesis.

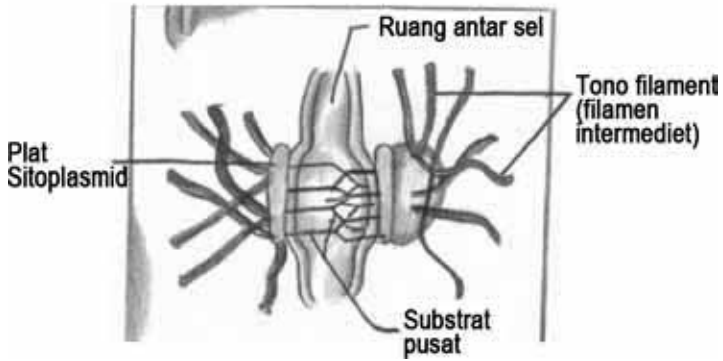


**Gambar 9.3.**  
Mikrovili  
(Darnell et. al.,  
1986. Gambar  
ulang oleh  
Penulis)

Skema dua buah sel yang bertautan, menunjukkan susunan aktin pada desmosoma pending.

## Desmosom dan Hemidesmosom

Desmosom merupakan salah satu pertautan penambat, Bentuk dan struktur pertautan tambat sangat beragam. Pada sel-sel bukan sel pertautan ini berupa bercak atau garis pelekatan yang menghubungkan filament korteks sitoplasma dari sel-sel yang berdampingan Pada set jaringan epithelium berupa pending pelekatan disekeliling setiap sel yang berinteraksi. Letak per apiko-lateral, tepat di bawah pertautan sumbat. Pending pelekatan ini disebut dengan nama desmosoma pending. Disamping itu juga di kenal Desmosoma yang merupakan salah satu pertautan penambat, berbeda dengan *desmosome pending*, desmosom yang lebih dikenal dengan desmosom bercak/*spot desmosome* (gambar 9.4) ini berbentuk seperti kancing baju dan merupakan titik persentuhan antara dua buah sel yang berdampingan. Di tempat selaput sel kedua buah sel saling bersinggungan, tetapi masih berjarak sekitar 30 nanometer. Pengamatan dengan mikroskop elektron menunjukkan bahwa desmosom bercak ini mempunyai struktur yang rumit. Permukaan sitoplasmik selaput sel di daerah desmosom dilapisi dengan materi padat elektron, dan padanya terjulur filamen berukuran sekitar 10 nanometer. Filamen-filamen ini disebut tonofilamen, yang berperan sebagai penyangga. Tonofilamen-tonofilamen ini saling berhubungan satu dengan yang lain. Ruang antar sel di daerah desmosom berisi cairan yang berperan sebagai perekat, yang disebut substrat pusat.



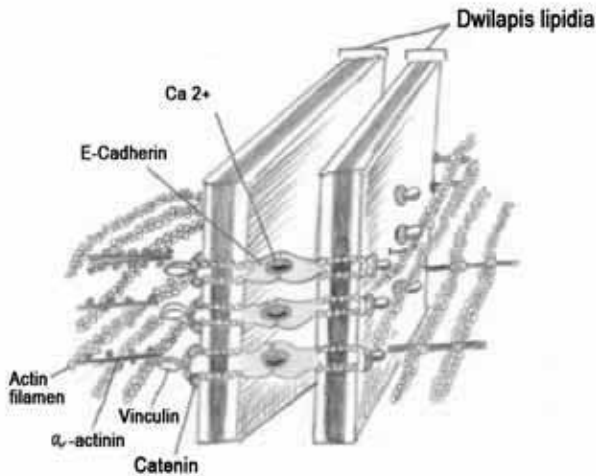
**Gambar 9.4.** Diagram desmosoma bercak dengan bagian-bagiannya (Darnel et. al., 1986. Gambar ulang oleh Penulis)

Hemidesmosom merupakan setengah desmosom. Ditinjau dari segi morfologi, pertautan ini mirip dengan desmosom, namun berbeda dalam fungsi dan komposisi kimia. Pertautan ini tidak menambatkan selaput sel-sel yang berdampingan tetapi merekatkan permukaan basal sel epitelium ke lamina basa atau matriks ekstra sel.

## 2. Pertautan Penghubung (Communicating Junction/Gap Junction)

Jenis junction yang ketiga adalah *communicatin junction* disebut *gap junction* yang memberikan sifat hidrofilik dalam membran plasma melalui ion-ion dan molekul-molekul kecil yang dapat melewati secara langsung diantara sel-sel. *Gap junction* ini muncul sebagai daerah dimana membran plasma dari sel-sel yang berdekatan diluruskan dan dipisahkan oleh tempat yang sangat sempit. Bagian tipis *communicating junction* berbentuk paralel dengan permukaan sel

menampakkkan bahwa ruang ekstra seluler berisi paket silinder cekung tertutup yang disusun secara tegak lurus dengan permukaan membran dalam suatu pola yang sering berbentuk segienam beraturan di dalam junction.



Gambar 9.5.

Mikrograf elektron transmisi, menunjukkan desmosoma bercak. Diagram desmosoma bercak, menunjukkan susunan filamen intermedia dalam hal ini tonofilamen pada pelat sitoplasmik (Dokumen Penulis)

Silinder kecil di dalam junction disebut *connexons* bergerak langsung melalui membran plasma sel yang dihubungkan oleh *junction* masing-masing silinder ditembus oleh saluran pusat yang sempit (sekitar 2 nm lebarnya) yang menyebar sepenuhnya melalui connexon melalui aliran langsung dari ion-ion dan molekul kecil diantara sel-sel yang membagi *communicating junction*.

*Communicating junction* dengan jelas menyediakan jalan bagi kemungkinan terjadinya komunikasi yang sangat cepat diantara sel-sel. Komunikasi ini mengambil bentuk dari ion-ion dan molekul-molekul kecil seperti hormon steroid yang bergerak langsung dari sel ke sel berikutnya melalui saluran pusat silinder connexon di dalam junction.

Junction jenis ini telah ditemukan pada vertebrata dan invertebrata. Pada vertebrata junction terjadi diantara bagian seluruh tubuh kecuali bagian otot rangka, peredaran darah dan sebagian besar sel syaraf (*neuron*). Semua itu sebagian melimpah diantara sel-sel pembuluh darah jantung dan mulut, sel-sel sistem pencernaan dan uterus dimana junction mengadakan hubungan langsung secara elektrik melalui alat-alat aliran ion yang menyatukan sel-sel otot dan menggerakkan kontraksinya sebagai satu unit fungsional.

Tiga tipe sel junction merupakan penyesuaian karakteristik dari berbagai sel hewan. Melalui peranannya dalam sel, *adhesi*, *sealing* dan *communicating junction*, ketiganya menempati sel tubuh secara bersama-sama, mencegah cairan dalam bagian tubuh yang berbeda dari campuran dan langsung menyusun hubungan sel dengan yang menyatukan jaringan tubuh dan organ ke dalam unit-unit fungsional. Misalnya, penerapan junction yang utama adalah menggabungkan sel-sel kedalam struktur dan pengelompokkan fungsional yang memungkinkan hewan hidup sebagai multi seluler.

Pertautan celah yang disebut juga neksus, terdapat pada hampir semua sel jaringan hewan. Pada mikroskop elektron transmisi terlihat sebagai bercak-bercak. Selaput sel dari sel-sel yang berdampingan dipisahkan oleh celah yang

sangat sempit, berukuran sekitar 3 nanometer. Mikrograf elektron dari hepatosit menunjukkan suatu struktur yang tampak seperti 7 bilur, 4 gelap 3 terang (gambar 9.6)



**Gambar 9.6**

Mikroraf elektron transmisi 2 buah hepatosit menunjukkan pertautan celah (Dokumen Penulis)

Terdapat dua jenis permeabilitas yaitu perangkat metabolik dan perangkat ionik atau elektronik. Molekul-molekul dengan berat molekul sampai 1000 dalton dapat dengan bebas lewat melalui pertautan celah. Hal ini memungkinkan penyebaran ion, gula, asam amino, nukleotida, vitamin, hormon, dan molekul-molekul BM rendah lainnya, diantara kelompok sel yang bertautan di dalam suatu jaringan. Perangkat metabolik ini digunakan untuk membagikan makanan ke sel-sel selama perkembangan dan memasok molekul-molekul pengatur, misalnya CAMP ke sel-sel selama deferensiasi jaringan.

Permeabilitas pertautan celah ini dipengaruhi oleh ion  $\text{Ca}^{2+}$  di dalam sel. Bila kadar ion  $\text{Ca}^{2+}$  di dalam sel tinggi hubungan antar sel pada pertautan celah tertutup, dan akan terbuka kembali bila kadar  $\text{Ca}^{2+}$  kembali ke keadaan normal. Diduga  $\text{Ca}^{2+}$  mengubah susunan molekul-molekul koneksin pada konekson.

Dengan adanya dinding sel, sulit bagi sel tumbuhan untuk mengadakan hubungan dan pembagian zat-zat makanan. Namun demikian, sel-sel tumbuhan tetap dapat berhubungan. Hubungan ini dilakukan lewat saluran-saluran terbuka berdiameter 20 sampai 40 nanometer, yang disebut plasmodesma. Di tengah-tengah plasmodesma terdapat saluran lain yang lebih sempit disebut desmotubula yang merupakan kelanjutan dari RE di sekeliling desmotubula terdapat sitosol dari sel-sel yang bertetangga. Plasmodesma ini mulai terbentuk pada saat sel membelah.

## C. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan secara deskriptif pertautan sumbat !
2. Jelaskan secara deskriptif pertautan penambat !
3. Jelaskan secara deskriptif pertautan penghubung !
4. Jelaskan fungsi pelekatan sel !
5. Jelaskan fungsi plasmodesmata !



## Bab X

# Komunikasi Antarsel

## A. Pendahuluan

Sel-sel di dalam organisme multiseluler perlu melakukan komunikasi satu dengan yang lain demi keseimbangan dan keserasian kerjanya. Umumnya komunikasi dilakukan untuk memediasi perkawinan atau 'mating', dengan perkembangan organisme multiseluler, kelompok sel yang berbeda memiliki fungsi yang berbeda dan menjadi penting bagi sel untuk mengkomunikasikan banyak aspek hidupnya. Beberapa kelompok sel juga berperan dalam mengontrol tingkah laku kelompok sel lain.

Informasi dapat datang dalam berbagai bentuk dan seringkali melalui proses merubah sinyal informasi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Ketika kita menelepon teman, sederhananya, gelombang suara kita dirubah ke dalam bentuk sinyal listrik sehingga dapat melalui kabel telepon. Poin penting dari proses tersebut adalah ketika pesan dirubah dari satu bentuk ke bentuk lain, proses perubahan ini disebut transduksi sinyal.



Sinyal-sinyal antar sel jauh lebih sederhana daripada bentuk-bentuk pesan yang biasanya dirubah oleh manusia. Pada komunikasi khas antar sel, sel pemberi sinyal menghasilkan tipe khusus dari molekul sinyal yang dapat dideteksi oleh sel target. Sel target memiliki protein reseptor yang mampu mengenali dan berespon secara spesifik terhadap molekul sinyal. Transduksi sinyal dimulai ketika protein reseptor pada sel target menerima sinyal ekstraselular yang baru masuk dan merubahnya menjadi sinyal intraselular yang memerintah perilaku sel. Transduksi sinyal adalah proses ketika sinyal dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, pesawat telepon merubah sinyal listrik ke sinyal suara. Sel target merubah sinyal ekstraseluler ke sinyal intraseluler. Komunikasi antar sel berperan penting untuk pengaturan dan pengendalian kegiatan sel, jaringan, organ tubuh, dan untuk mempertahankan homeostasis.

Dalam tubuh manusia terdapat dua jenis komunikasi antar sel, yaitu: *wired system* (komunikasi melalui saraf atau listrik) dan *non-wired system* (komunikasi kimiawi). Sedangkan komunikasi intra sel adalah komunikasi yang terjadi di dalam sel. Komunikasi intra sel merupakan proses pengubahan sinyal di dalam sel itu sendiri.

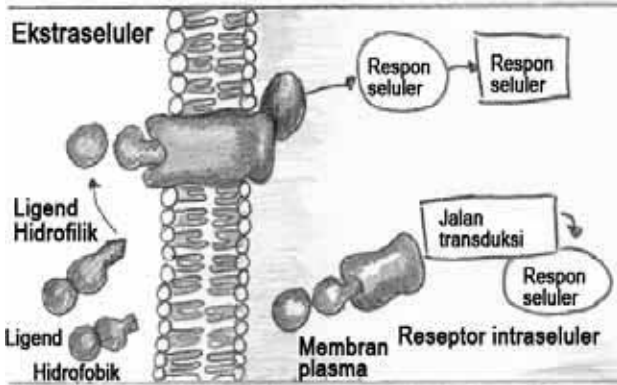
Komunikasi listrik merupakan komunikasi yang cepat dengan hitungan milidetik, informasi yang dihantarkan sepanjang sel saraf berbentuk potensial aksi. Penghantaran informasi dari sel saraf ke sel target berlangsung melalui sinaps, yang dikenal sebagai transmisi sinaps. Sedangkan komunikasi kimiawi berlangsung lebih lambat namun

efeknya lebih lama. Komunikasi saraf dan komunikasi kimiawi dapat terjadi secara tumpang tindih. Beberapa zat kimia seperti neurotransmitter, hormon, dan neurohormon tidak dapat menembus sel. Informasi yang akan dihantarkan harus dirubah dulu oleh protein membran sel ke sinyal kimia di dalam sel.

Komunikasi sel berperan penting dalam menyelenggarakan homeostasis karena tubuh harus senantiasa memantau adanya perubahan-perubahan nilai berbagai parameter, lalu mengkoordinasikan respons yang sesuai sehingga perubahan yang terjadi dapat diredam. Untuk itu sel-sel tubuh harus mampu berkomunikasi satu dengan lainnya. Komunikasi antar sel merupakan media yang menopang pengendalian fungsi sel atau organ tubuh. Pengendalian yang paling sederhana terjadi secara lokal (intrinsik) yaitu dengan komunikasi antar sel yang berdekatan. Pengendalian jarak jauh (ekstrinsik) lebih kompleks dan dimungkinkan melalui refleks yang dapat melibatkan sistem saraf (lengkung refleks) maupun sistem endokrin (pengaturan umpan balik).

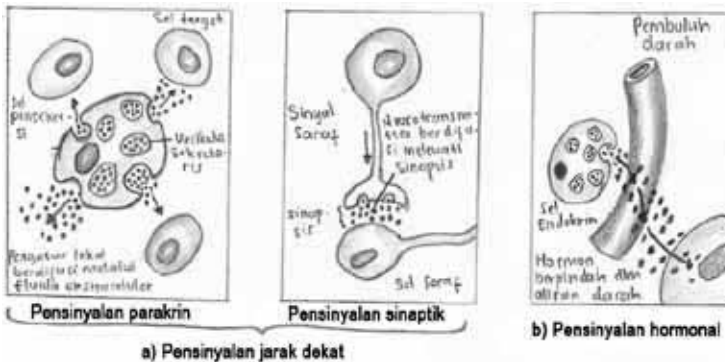
## B. Jenis-Jenis Komunikasi Sel

Komunikasi antara sel dapat melalui *ligand* yaitu berupa molekul signal dan reseptor protein sebagai molekul peresepor. Reseptor terletak di plasma membran atau di sel (gambar 10.1).



Gambar 10.1. Signal reseptor pada Membran Sel (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Empat mekanisme komunikasi seluler antara lain : kontak langsung (*Direct contact*), pensinyalan parakrin (*paracrine signaling*), pensinyalan endokrin (*endocrine signaling*) dan pensinyalan sinaptik (*synaptic signaling*) (gambar 10.2).

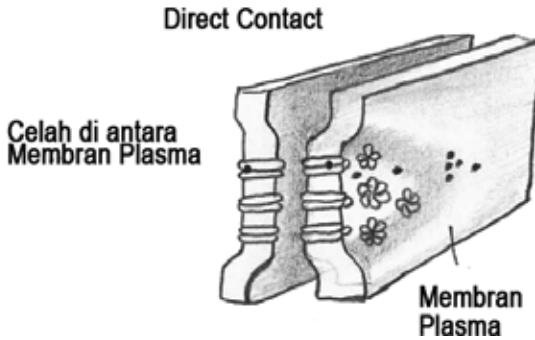


Gambar 10.2. Empat Mekanisme Komunikasi Seluler, Komunikasi Sel Jarak Dekat atau Jarak Jauh pada Hewan (Dok. Penulis)

**Keterangan Gambar:**

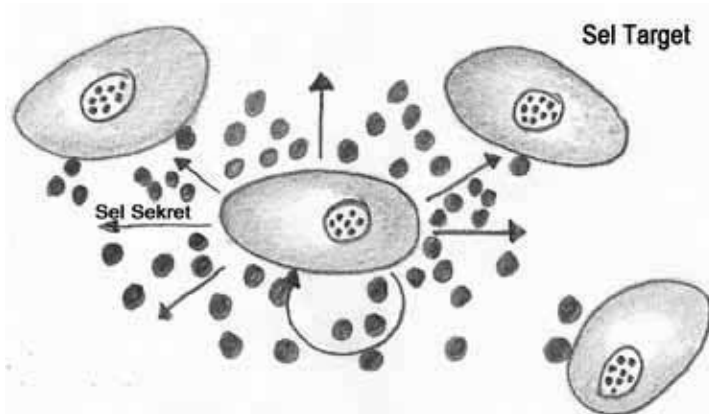
- (a) Hewan memiliki dua jenis utama pensinyalan kimiawi jarak dekat. Pada pensinyalan parakrin, sel pensекреksi bertindak pada sel target di dekatnya dengan melepas molekul pengatur lokal ke dalam fluida ekstraseluler. Dalam pensinyalan sinaptik, sel saraf melepaskan molekul neurotransmitter ke dalam sinapsis, ruang sempit, di antara sel pengirim dan sel target, dalam hal ini sel saraf yang lain.
- (b) Hormon mensinyal sel target pada jarak yang lebih jauh. Pada hewan, sel endokrin terspesialisasi mensekresi hormon ke dalam cairan tubuh, seringkali darah. Hormon dapat mencapai hampir seluruh sel tubuh, tetapi jika dengan pengatur lokal, hanya sel target spesifik yang mengenali dan merespons sinyal kimiawi yang diberikan.

Jenis komunikasi sel yang ke-1 dengan kontak langsung adalah molekul pada permukaan satu sel yang dikondisikan oleh reseptor pada sel sebelahnya (*adjacent cell*) (gambar 10.3). Hewan dan tumbuhan memiliki junction yang memberikan kontinuitas sitoplasmik di antara sel sel yang berdekatan. Bahan pensinyalan larut dalam sitosol dapat dengan bebas melewati sel yang berdekatan. Kemungkinan sel hewan berkomunikasi melalui kontak langsung di antara molekul-molekul pada permukaan. Penting pada perkembangan embryo dan dalam pengoperasian sistem imun.



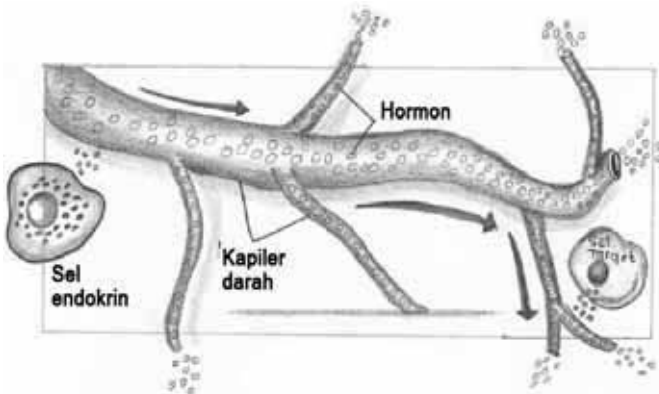
**Gambar 10.3.** Komunikasi Sel : Kontak Langsung  
(Dok. Penulis)

Jenis komunikasi sel yang ke-2 adalah pensinyalan parakrin. Signal yang dikeluarkan dari sel memberikan efek kepada sel yang ada di sebelahnya. Sel pensекреksi bertindak sebagai sel target di dekatnya dengan melepas molekul pengatur lokal ke dalam fluida ekstraseluler (gambar 10.4).



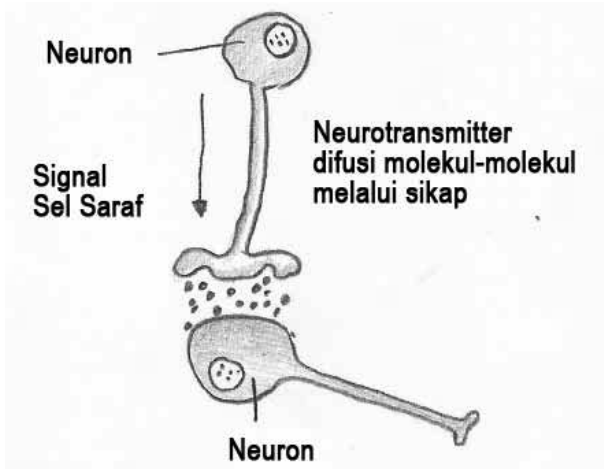
**Gambar 10.4.** Komunikasi Sel : Pensinyalan Parakrin  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Jenis komunikasi sel yang ke-3 adalah pensinyalan endokrin. Hormon dikeluarkan dari sel berefek ke sel lain melalui badan sel. Pada hewan, pensinyalan endokrin. Sel terspesialisasi melepas molekul hormon ke dalam sistem pembuluh pada sistem peredaran kemudian hormon tersebut mengalir ke sel target pada bagian tubuh lain (gambar 10.5).



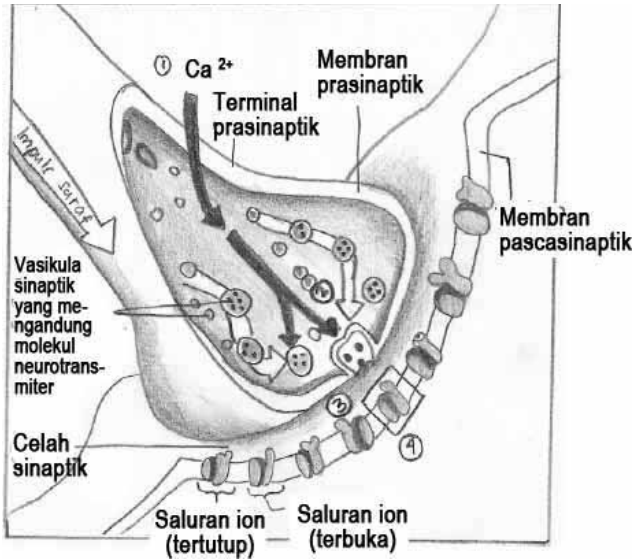
**Gambar 10.5.** Komunikasi Sel : Pensinyalan Endokrin  
(Darnell *et.al*, 1986. Gambar ulang oleh Penulis)

Jenis komunikasi sel yang ke-4 adalah pensinyalan synaptic. Sel saraf mengeluarkan signal (neurotransmitter) dimana sebagai pengikat reseptor pada sel di dekatnya (*nearby cells*) (gambar 10.6).



**Gambar 10.6.** Komunikasi Sel Pensinyalan Synap  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Synap adalah tempat kontak antar sel yang dapat dirangsang. Sinapsis terbagi menjadi dua yaitu Sinapsis kimia dan sinapsis listrik. Sinapsis kimia yaitu sel saraf melepaskan molekul neurotransmitter ke dalam sinapsis (ruang sempit di antara sel pengirim dan sel target) (gambar 10.7). Komunikasi antar sel dengan cara melewatkan senyawa kimia melalui saluran yang diatur oleh perubahan jumlah ion.



Gambar 10.7. Sinapsis Kimia (Dok. Penulis)

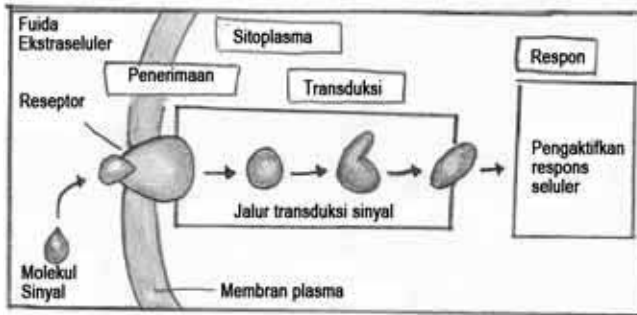
Sinapsis listrik adalah persambungan antar sinaps melalui saluran tipis intraselluler (connexons). Hubungan dua buah sel berupa arus listrik secara langsung. *Gap junction* diantara kedua yang berkontak dan mengalir arus listrik. Terjadi di sel-sel jantung, otot polos di saluran pencernaan, beberapa neurons di retina mata.

## C. Tahap Pensinyalan

Pada komunikasi sel ini memiliki tiga tahap pensinyalan. Pada saat sel bertemu sinyal harus dikenali oleh molekul reseptor spesifik dan informasi yang dibawa sinyal tersebut harus



dibuat ke bentuk lain (ditransduksi) di dalam sel tersebut sebelum sel yang bersangkutan dapat meresponnya. Tiga Tahapan pensinyalan yaitu: penerimaan, transduksi, dan respon (gambar 10.8).



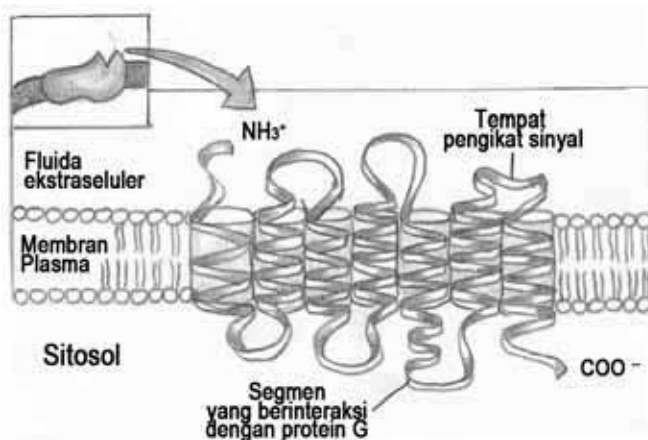
**Gambar 10.8.** Tiga Tahapan Pensinyalan  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Pada tahap penerimaan (*reception*) sinyal merupakan pendektasian sinyal yang datang dari luar oleh sel target. Sinyal kimiawi “terdeteksi” apabila sinyal itu terikat pada protein seluler biasanya pada permukaan sel yang bersangkutan. Pada tahap pengikatan molekul sinyal mengubah protein reseptor dengan demikian mengawali (menginisiasi) proses transduksi . Tahap transduksi ini mengubah sinyal menjadi suatu bentuk yang dapat menimbulkan respon seluler spesifik. Sinyal yang ditransduksi memicu respons seluler spesifik. Respons dapat berupa hampir seluruh aktivitas seluler seperti katalis oleh suatu enzim (seperti glikogen fosforilase), penyusunan ulang sitoskeleton, atau pengaktifan gen spesifik di dalam nukleus.

Penerimaan sinyal dan inisiasi transduksi. Molekul sinyal terikat pada protein reseptor. Protein mengalami

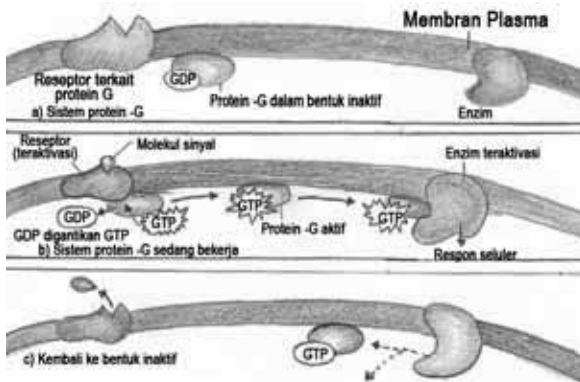
perubahan bentuk, molekul sinyal mempunyai bentuk yang berkomplementer dengan tempat reseptor dan molekul terikat dengan tempat tersebut. Molekul sinyal seperti ligan, pengikata ligan menyebabkan protein reseptor mengalami perubahan konformasi (bentuk). Perubahan bentuk akan mengaktifkan reseptor sehingga berinteraksi dengan molekul seluler lainnya.

Penerimaan sinyal dan inisiasi transduksi memiliki tiga tipe reseptor membran yaitu reseptor terkait protein-G, reseptor tirosin-kinase, dan reseptor saluran ion. Struktur reseptor terkait Protein-G merupakan polipeptida tunggal yang digambarkan dengan sebuah pita memiliki tujuh heliks alpha transmembran. Putaran yang spesifik berhubungan dengan tempat-tempat dimana molekul sinyal dan protein G-terikat (gambar 10.9).



**Gambar 10.9.** Struktur Reseptor terkait Protein G (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

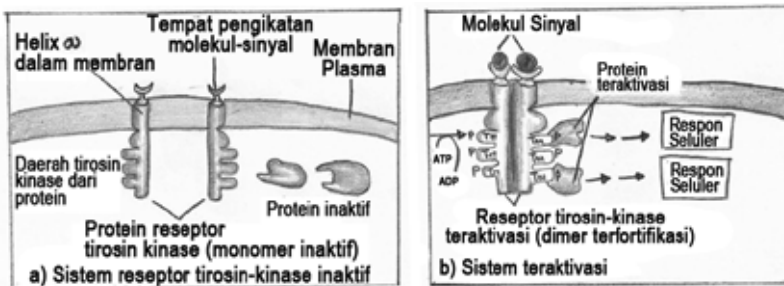
Cara memfungsikan reseptor terkait protein-G adalah tipe reseptor ini berupa protein membran yang bekerja bersamaan dengan protein-G dan protein lainnya, biasanya suatu enzim. Dalam ketiadaan molekul sinyal ekstraseluler spesifik untuk reseptor ketiga protein berada dalam bentuk inaktif. Protein G-inaktif memiliki satu molekul GDP yang terikat padanya. Apabila molekul sinyal terikat dengan reseptor, reseptor akan berubah bentuk sedemikian rupa sehingga reseptor ini mengikat dan mengaktifkan protein G. Satu molekul GTP menggantikan GDP pada protein G. Protein G aktif (yang bergerak leluasa di sepanjang membran) mengikat dan mengaktifkan enzimnya yang memicu langkah berikutnya dalam jalur itu yang menimbulkan respons sel yang bersangkutan. Protein-G mengkatalisis hidrolisis GTP dan melepaskannya dari enzim, siap digunakan. Ketiga protein tetap melekat pada membran plasma (gambar 10.10).



Gambar 10.10.

Cara Memfungsikan Reseptor terkait Protein-G  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

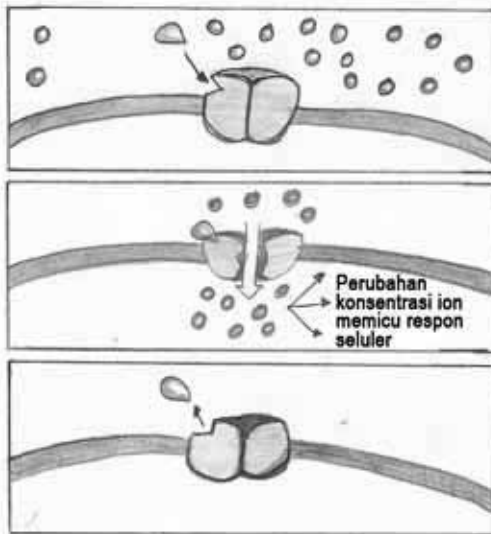
Pada reseptor tirosin-kinase dalam ketiadaan molekul sinyal spesifik, reseptor tirosin-kinase berupa polipeptida tunggal dalam membran plasma. Bagian ekstraseluler protein ini, dengan tempat pengikatan molekul-sinyal, dihubungkan oleh heliks alpha transmembran tunggal ke bagian sitoplasmik protein. Bagian protein ini bertanggung jawab untuk aktivitas tirosin-kinase reseptor & memiliki sederetan asam amino tirosin. Ketika molekul sinyal (faktor pertumbuhan) melekat pada tempat pengikatannya, dua polipeptida akan mengumpul & membentuk dimer. Menggunakan gugus fosfat dari ATP, daerah tirosin-kinase setiap polipeptida memfosforilasi tirosin pada polipeptida lain. Setelah teraktivasi sepenuhnya, protein reseptor mengikat protein intraseluler spesifik yang melekat pada tirosin terfosforilasi tertentu dan juga teraktivasi. Masing-masing menginisiasi jalur transduksi sinyal yang menimbulkan respon seluler spesifik reseptor tirosin-kinase sering mengaktifkan beberapa jalur transduksi sinyal sekaligus, membantu mengatur fungsi sel yang sangat rumit. Aktivasi yang tidak sesuai dari reseptor dapat menyebabkan pertumbuhan sel yang tidak terkontrol contohnya kanker.



**Gambar 10.11.** Struktur dan Fungsi Reseptor Tirosin-Kinase  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

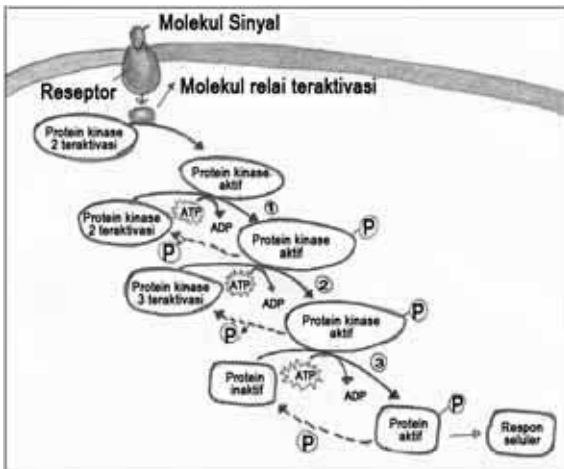
Pada reseptor saluran ion memiliki gerbang ligan. Reseptor merupakan protein transmembran dalam membran plasma yang membuka untuk membiarkan aliran dari jenis ion spesifik yang melintasi membran ketika molekul sinyal spesifik terikat pada sisi ekstraseluler protein tersebut (gambar 10.12).

Pada reseptor intraseluler, tidak semua reseptor sinyal berupa protein membran, sebagian berupa protein yang terletak di sitoplasma/nukleus sel target. Untuk mencapai reseptor, pesan kimiawi harus dapat melintasi membran plasma sel targetnya. Ukuran cukup kecil sehingga melewati fosfolipida membran atau molekul berupa lipida sehingga terlarut dalam membran ini. Messenger kimiawi: hormon steroid, hormon tiroid, nitric oxide (NO).



Gambar 10.12. Reseptor Saluran Ion (Dok. Penulis)

Jalur transduksi sinyal (*signal transduction pathways*) adalah jalur-jalur merelay sinyal dari reseptor ke respons seluler. Pengikatan molekul sinyal ekstraseluler spesifik pada reseptor membran memicu langkah pertama seperti kartu domino. Fosforilasi protein suatu cara pengaturan yang umum dalam sel. Mekanisme utama transduksi sinyal adalah reseptor yang diaktifkan sinyal akan mengaktifkan protein lain untuk mengaktifkan molekul lain dan seterusnya. Molekul-molekul yang merelay sinyal dari reseptor ke respons (molekul-molekul relay). Banyak molekul relay berupa protein kinase. Jalur pensinyalan bermula ketika molekul sinyal terikat pada reseptor membrane. Reseptor mengaktifkan satu molekul relay yang mengaktifkan protein kinase 1. Protein kinase 1 aktif mentransfer satu fosfat dari ATP ke molekul protein kinase 2 yang inaktif sehingga akan mengaktifkan kinase ke 2. Protein kinase 2 yang aktif mengkatalisis fosforilasi dan aktivasi protein kinase 3. Protein kinase 3 aktif memfosforilasi protein yang menghasilkan respons akhir sel atas sinyal tadi (gambar 10.13).



**Gambar 10.13**  
 Jalur  
 Transduksi  
 Sinyal (Dok.  
 Penulis)

Terdapat protein dengan molekul kecil dan ion kecil tertentu yang merupakan komponen utama jalur pensinyalan. Ukuran kecil dan terlarut menyebabkan menyebar ke seluruh sel dan berdifusi. cAMP merupakan messenger kedua. Molekul sinyal (messenger pertama) mengaktifkan reseptor terkait-protein G spesifik mengaktifkan protein G spesifik. Protein G spesifik mengaktifkan adenilil siklase mengkatalisis perubahan ATP menjadi cAMP. cAMP kemudian mengaktifkan protein lain, misalnya protein kinase.

Seperti yang telah diuraikan di atas bahwa sel dengan sel saling berkomunikasi, saling memberi sinyal persis layaknya kehidupan manusia. Adanya komunikasi antar sel menyebabkan manusia dapat hidup normal. Berkaitan dengan hal tersebut telah dikembangkan pula bahwa molekul dari seseorang dapat berinteraksi dengan molekul orang lain, bahkan molekul tertentu dapat digunakan untuk mengenal ibu dengan anak atau ayah dengan anak. Bahkan lebih mutakhir lagi, pengenalan antarsuku bangsa dapat melalui molekul DNA. Dalam konsep ini Al Qur'an dalam surat al-Hujurat ayat 13.

*“Tuhan menciptakan manusia bersuku-suku, berbangsa-bangsa agar kamu saling mengenal”*

Jadi saling berkomunikasi relevan dengan ayat tersebut, sel dengan sel atau molekul-molekul yang berbeda diciptakan Allah untuk berkomunikasi.

## D. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan perbedaan jenis-jenis komunikasi sel !
2. Jelaskan perbedaan antara sinapsis kimia dan listrik !
3. Jelaskan tiga tahapan pensinyalan pada komunikasi sel!
4. Jelaskan perbedaan tiga tipe reseptor membran !
5. Jelaskan apa yang dimaksud dengan messenger kedua !



## Bab XI

# Pembelahan Sel

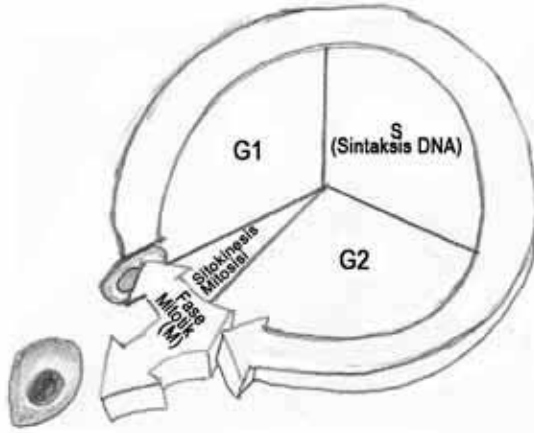
## A. Pendahuluan

Kehidupan organisme dari tumbuhan dan hewan yang bersel satu sampai yang lebih kompleks, tumbuh dan berkembang biak melalui proses yang terjadi di tingkat seluler. Pertumbuhan dan penambahan ukuran dan isi sel tergantung pada kondisi molekuler sel baru, termasuk protein, asam nukleat, lipid dan karbohidrat. Periode pertumbuhan dapat diikuti, interfase, perkembang-biakan sel dengan pembelahan. Berbagai macam pertumbuhan dan pembelahan sel pada sel eukariotik, membelah secara mitosis, produksi sel anak itu berisi informasi hereditas dari sel induknya. Dalam mitosis, rangkaian DNA mengganda secara nyata sejak awal pembelahan, membelah sama, tepat dan akhirnya terbentuk sel baru yang sama.

Penggandaan semua bagian dari sel diikuti oleh pembelahan sel menjadi dua sel anak disebut daur sel, yang mencakup dua fase yaitu pembelahan sel (M) dan interfase (gambar 11.1). Pembelahan sel meliputi dua fase yaitu



kariokinesis dan sitokinesis. Interfase mencakup tiga tahapan yaitu G1 (growth 1), S (sintesis) dan G2 (growth 2).



**Gambar 11.1.** Daur Sel

(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Daur sel pada tumbuhan dan hewan memerlukan waktu kira-kira 20 - 24 jam. Pembelahan sel atau mitosis hanya memerlukan kira-kira 1 jam. Sisa waktu diperlukan bagi pertumbuhan interfase. Waktu antara pembelahan mitosis dan replikasi DNA disebut fase G1. Selama tahap G1 terjadi proses-proses penting yang memungkinkan sel untuk masuk dalam tahap S dan tahapan pada pembelahan sel yang akan terjadi. Tahap S terjadi replikasi tiap kromosom. Setelah tahap S biasanya sel belum siap untuk melakukan tahap pembelahan, tetapi masuk kedalam tahap kedua yaitu tahap G2.

Pada tahap ini terjadi peningkatan sintesis protein dan persiapan akhir bagi pembelahan sel. Pada daur sel

terdapat dua titik transisi yang penting yaitu : 1) tahap G1 dan tahap S, pada waktu dimulai replikasi kromosom dan 2) antara tahap G2 dan tahap mitosis pada waktu kromosom memadat dan mitosis dimulai.

Fase mitosis diawali dengan serangkaian proses fosforilasi protein yang dipacu oleh MPF dan diakhiri oleh proses defosforilasi sehingga protein-protein itu kembali ke keadaan interfase. Fosforilasi yang terjadi selama mitosis menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan morfologis pada sel, seperti; kondensasi kromosom, menghilangnya selubung nuklear dan perubahan organisasi sitoskelet. Pada proses pembelahan ini yang berperan aktif adalah dua kelompok komponen berada di sitoskelet. Kelompok yang dibentuk pertama kali adalah gelendong (apparatus) mitosis yang terdiri dari mikrotubul. Gelendong mitosis mengatur kromosom pada suatu sekat yang membagi sel menjadi dua bagian. Sekat ini disebut bidang equatorial. Tiap belahan kromosom yang berada di daerah equatorial ditarik ke kutub sel untuk mikrotubul dari gelendong mitosis. Kelompok kedua yaitu cincin kontraktile yang terdiri dari aktin dan miosin. Cincin kontraktile ini berperan sebagai pembentuk pelekukan (invaginasi) selaput sel pada proses sitokinesis.

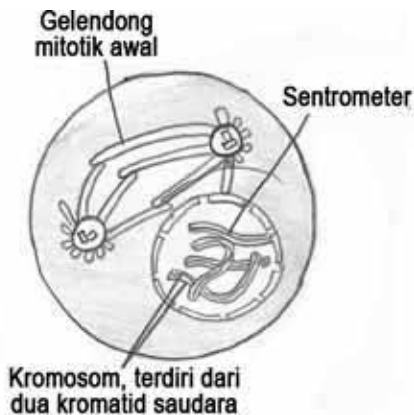
## B. Pembelahan Secara Mitosis

Mitosis terbagi atas empat tahapan yaitu: profase (pro artinya sebelum), metafase (meta artinya antara), anafase (ana artinya kembali) dan telofase (telo artinya berakhir).

## 1. Profase

Selama profase, molekul DNA inti mengganda beserta protein histon dan nonhiston melipat menjadi lebih pendek, strukturnya menebal dapat lebih mudah berkumpul dan digerakan oleh aparatus pembelahan. Kromosom dalam intinya memadat menjadi bagian yang lebih tebal. Bagian-bagian itu akan membelah menjadi dua bagian. Tiap dua bagian kromosom ini disebut kromatid yang bentuknya sama sebagai hasil dari duplikasi DNA dan protein kromosom yang sama sebelum pembelahan sel.

Pada waktu yang bersamaan kromosom melipat dan berkondensasi dengan bentuk dan ukuran yang berbeda. Perbedaan struktur ini tergantung dari panjang dan lebarnya kromosom dan tempat yang menyempit disebut konstiksi. Setiap kromosom biasanya mempunyai daerah yang menyempit yang permanen dan disebut konstiksi primer. Konstiksi primer menentukan spindle mikrotubulus yang membagi kromosom.



**Gambar 11.2.** Kromosom pada Profase  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Sebagian besar hewan dan tumbuhan tingkat rendah struktur kinetokornya berlapis yang dibangun dari dua atau tiga lapisan, yaitu lapisan yang paling atas, lapisan tengah yang padat dan lapisan paling bawah yang kurang padat dan biasanya lapisan yang paling dalam merapat pada serat kromatinnya. Ukuran kinetokor ini diameternya antara 0,2 sampai dengan 0,8 mikrometer dan ketebalannya antara 60 sampai dengan 150 nanometer. Pada saat kromosom melekat pada spindel, mikrotubulus gelendong melekat pada kinetokor. Penggumpalan dari kinetokor (gambar 11.2) ini berbentuk bundel yang disebut spindel fiber (benang gelendong).

Spindel kromosom merangkai dalam sitoplasma baik dalam pembentukan sebelum maupun sesudah pembentukan mikrotubulus baru. Perangkaian dan pertumbuhan spindel mengikuti satu atau dua cara yang berbeda tergantung dari apakah sentriolnya ada dalam sel tersebut. Sel yang di dalamnya ada sentriol bersatu dalam satu pasangan sentriol yang tersisa dalam sitoplasma yang hanya ada dalam lapisan luar. Sebelum formasi spindelnya dimulai, sentriol membelah secara langsung dan membentuk sama. Duplikat ini menghasilkan dua pasang sentriol yang di dalamnya mengandung mikrotubulus.

Selanjutnya sentriol berpisah dan bergerak ke arah sisi lain yang berlawanan dari nukleus, pada waktu yang bersamaan benang-benang dari mikrotubulus memanjang diantara sentriol mencapai akhir yang berlawanan dari sel, mikrotubulus mengelilingi nukleus. Masa mikrotubulus yang paralel bergerak ke arah inti, membelah lagi, membentuk

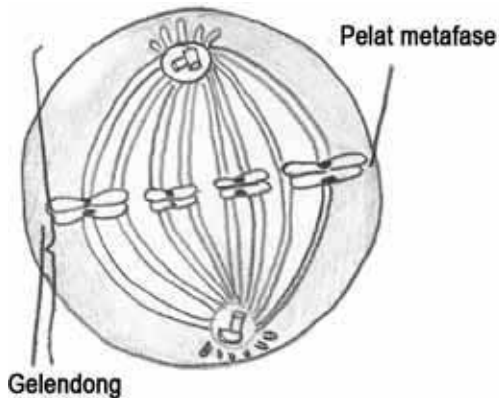
lagi kondensasi kromosom dalam sitoplasma. Apabila perkembangannya sudah penuh, spindel berisi ratusan sampai ribuan mikrotubulus paralel yang mengisi sebagian besar sel. Spindel mikrotubulus bergerak ke arah inti atau poles dari spindel dan memberikan bentuk struktur yang khusus.

Dalam organisme yang tidak memiliki sentriol, gelendong mikrotubulus berkumpul dalam sitoplasma sekitar nukleus secara paralel saat kondensasi kromosom. Pada saat selaput nukleus pecah (menghilang), gelendong memanjang ke dalam daerah yang sebelumnya ditempati nukleus. Ada atau tidaknya sentriol tidak mempunyai pengaruh dalam fungsi gelendong dalam pembagian kromosom. Bentuk gelendong dengan sentriol atau bentuk aster di kedua kutub kumparan. Gelendong terbentuk dalam sel-sel tanpa sentriol atau aster dekat di kutub-kutub, dua tipe yaitu tipe Astral dan Anastral. Sel-sel hewan mengandung sentriol-sentriol dan bentuk kumparan astral banyak tumbuhan tingkat rendah juga berbentuk kumparan-kumparan astral, kebanyakan dari Gymnospermae (konifera) dan semua Angiospermae (tumbuhan berbunga) tidak ada sentriol dan berbentuk kumparan anastral.

## 2. Metafase

Setelah profase, tingkat mitosis selanjutnya yaitu metaphase (gambar 11.3). Kadang-kadang antara profase dan metafase disebut prometafase. Ini merupakan fase pendek dimana kromosom kelihatan tidak teratur, selama selaput nukleus pecah dan gelendong-gelendong bergerak pada posisi yang sebelumnya ditempati nukleus.

Mikrotubul yang menempel pada kinetokor disebut mikrotubul kinetokor. Mikrotubul kinetokor ini memegang dua peranan penting yaitu; 1) Mengatur letak dua arah kromosom terhadap sumbu gelendong mitosis, sehingga setiap kinetokor sebuah kromosom menghadap kutub masing-masing, 2) Mengatur dan menggerakkan kromosom ke bidang equator yang membagi dua gelendong mitosis.



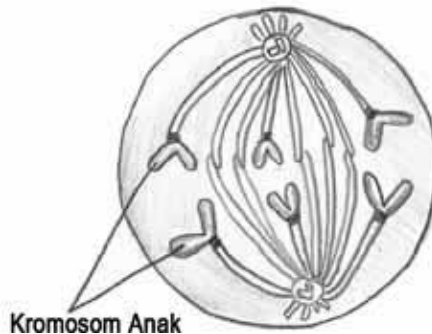
**Gambar 11.3.** Kromosom dalam Metafase  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Kedudukan kromosom pada bidang equator diatur dan dipantau oleh dua gaya tarikan yang sama kuat dari dua kutub sel. Makin dekat suatu kromosom ke kutub makin berkurang kekuatan tarikan kutub terhadapnya. Selain daya tarik kutub terdapat juga daya dorong kutub, sehingga sesuatu kromosom tidak dapat berada terlalu dekat ke salah satu kutub. Gaya tarik dan gaya dorong kutub, berlangsung terus sampai pada akhir metafase semua kromosom tersusun rapi di bidang equatorial. Metafase merupakan bagian penting pada proses mitosis. Pada saat ini sel seakan-akan istirahat sejenak, menunggu sampai

semua kromosom tersusun rapi di bidang equator. Waktu yang digunakan untuk pembelahan sel dapat diperpanjang beberapa jam atau beberapa hari, apabila pada profase atau prometafase, sel dipengaruhi dengan obat-obatan antimitosis misalnya kolkisin atau vinblastin.

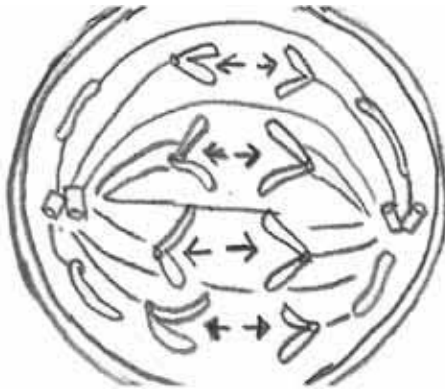
### 3. Anafase

Terjadi dengan tiba-tiba, diawali dengan terbelahnya kromosom menjadi dua kromatid, masing-masing dengan sebuah kinetokor. Benang-benang gelendong nampaknya berguna sebagai jalur penuntun gerakan kromosom ke kutub. Benang gelendong bersifat kontraktile dan dapat menarik kromosom ke arah kutub. Kromosom yang bergerak ke arah kutub biasanya berbentuk V dengan kinetokor pada puncaknya yang mengarah ke kutub. Dua kromatid dari kromosom berpisah dan bergerak kepada kutub kumparan yang berlawanan (gambar 11.4).



**Gambar 11.4.** Skema kedudukan kromosom pada prometafase dan metafase akhir (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Pemrakarsa anafase, bukan hanya gaya kontraksi, gaya tarik dan daya dorong dari gelendong mitosis saja. Beberapa percobaan menunjukkan bahwa kenaikan kadar ion  $\text{Ca}^{2+}$  di dalam sitosol terlihat dalam proses pemrakarsa anafase. Percobaan dengan menggunakan mikroskop elektron menunjukkan bahwa di daerah kutub berbentuk sejumlah vesikuli yang mengandung ion  $\text{Ca}^{2+}$  pada awal anaphase (gambar 11.5).



**Gambar 11.5**

Skema tahapan mekanisme penarikan kromosom  
(Dok. Penulis)

#### 4. Telofase

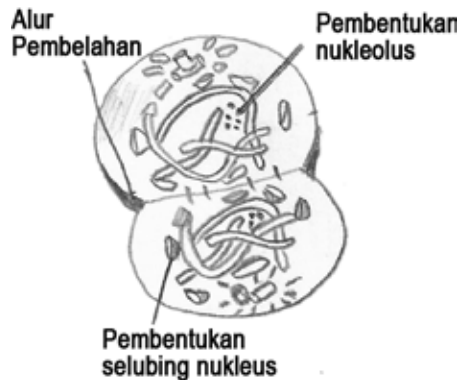
Menjelang akhir anafase, setiap kromosom membentuk dua kelompok pada setiap kutub. Jika kromosom telah mencapai kutub sel, maka mulailah tahapan terakhir dari mitosis yaitu telofase. Dalam tahapan ini beberapa proses berlangsung dengan serempak, pembentukan membran nukleus di sekeliling kelompok kromosom pada tiap kutub,



kromosom memanjang berubah menjadi kromatin dan pembentukan nukleolus.

Pada telofase, vesikula selaput nukleus berhubungan dengan setiap kromosom, dan melebur membentuk kembali membran nukleus. Porinukleus terakit kembali dan molekul-molekul lain yang terforforilasi bergabung kembali membentuk lamina nuklear (gambar 11.6).

Setelah nukleus terbentuk, sintesis RNA berlangsung lagi di setiap sel anakan yang menyebabkan nukleolus tampak lagi di setiap nukleus. Di saat ini pula kromosom terurai menjadi benang-benang kromatin dan membentuk susunan seperti pada saat interfase sel induknya.



**Gambar 11.6.** Kromosom pada Telofase  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## 5. Sitokinesis

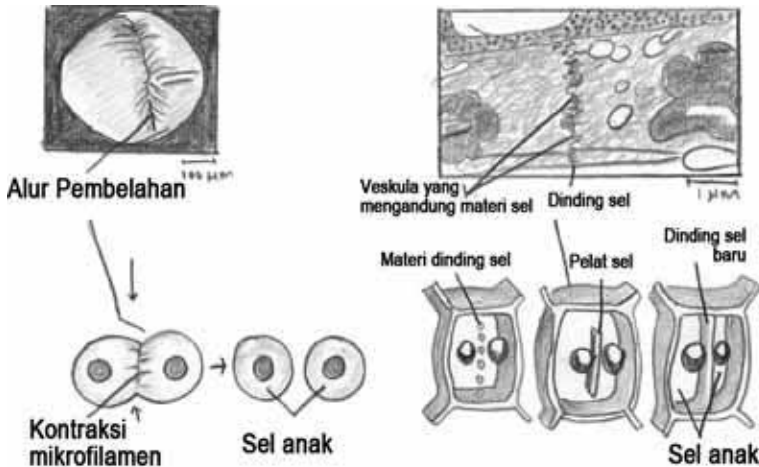
Pembelahan dari sitoplasma disebut sitokinesis. Sitokinesis pada umumnya mulai terjadi di saat anafase dan berlanjut selama telofase serta berakhir pada interfase

berikutnya. Pada sel hewan, tanda pertama yang terlihat yaitu meleukunya selaput sel selama anafase. Pelekukan terjadi di daerah sekat metafase atau bidang equator, tegak lurus sumbu panjang gelendong mitosis. Lekukan pembelahan terbentuk di sekeliling bidang equator sel induk, sehingga dua sel anak yang terjadi sama besar dan memiliki sifat-sifat yang sama. Pembelahan sitoplasma disempurnakan oleh kontraksi suatu cincin kontraktil terikat pada permukaan sitosolik selaput sel. Cincin kontraktil ini terakit di awal anafase selama pembelahan sel normal cincin kontraktil tidak menjadi lebih tebal di saat lekukan makin curam, apabila jarak antara selaput di daerah lekukan pembelahan menyempit. Membentuk badan tengah, cincin kontraktil akhirnya menghilang. Badan tengah mengandung sisa dua perangkat mikrotubul kutub yang terkemas erat oleh badan matriks sel.

Apabila terbentuknya dua sel anakan pada sel hewan merupakan akibat penggentingan mikrofilamen atau penjepitan permukaan sel dengan cincin kontraktil, maka pada sel tumbuhan, sitoplasma dibagi dua oleh pembentukan dinding sel baru di dalam sel induk.

Pembentukan dinding terjadi sepanjang arah bekas gelendong tempat lenyapnya gelendong tersebut yang letaknya tepat di tengah-tengah antara dua inti hasil mitosis. Mikrotubulus-mikrotubulus yang terletak di tengah tersebut dikelilingi oleh bahan padat dari gelembung yang berasal dari kompleks golgi. Lapisan mikrotubulus dan gelembung ini disebut pragmoplast. Gelembung-gelembung ini secara bertahap meningkat jumlahnya, hingga lapisan bersambung memanjang di tengah-tengah antara dinding sel gelembung-

gelembung. Melebur membentuk struktur berselaput yang dinamai sekat sel. Polisakarida yang berasal dari gelembung-gelembung bergabung di dalamnya, membentuk pektin, hemisellulosa dan komponen-komponen dinding sel lainnya. Sekat berkembang sampai akhirnya bersentuhan dengan dinding sel-sel induk. Akibatnya terbentuklah dua sel anak. Filamen-filamen yang terdiri dari selulosa disekresikan ke dalam lumen sekat, untuk membentuk dinding sel baru. Sebagai pembanding sitokinesis antara sel hewan dan tumbuhan disajikan pada gambar 11.7.

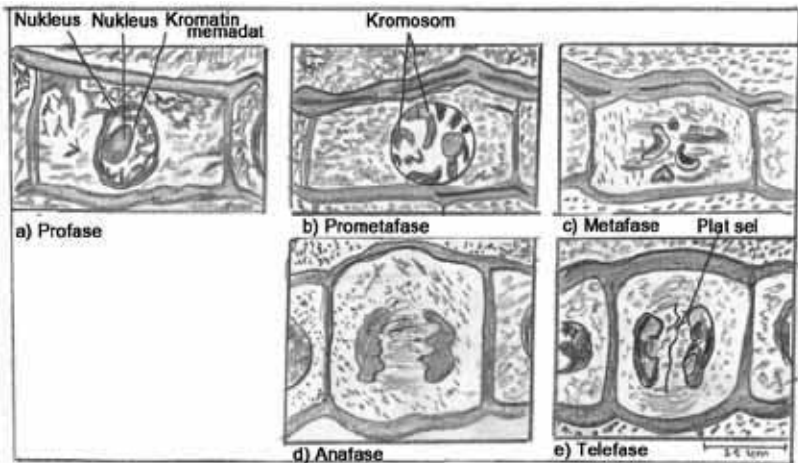


**Gambar 11.7**

Perbandingan Sitokinesis  
antara Sel Hewan dan Sel Tumbuhan  
(Bruce Albert, 1997. Gambar ulang oleh Penulis)

Pembentukan dinding sel mulai di daerah tengah dari pragmoplast dan secara bertahap memanjang menuju membran plasma yang arahnya berlawanan dengan

penggantung pada sel hewan. Hal ini terjadi saat gelembung-gelembung bersatu membentuk dua lapis membran plasma. Pada saat gelembung bersatu, materialnya dilepaskan ke ruang yang akan berkembang menjadi ruang ekstrasekuler. Saat proses penggabungan selesai kedua sel benar-benar terpisah oleh dua membran dengan dua dinding sel baru (Gambar 11.8). Pertumbuhan dan perkembangan sel eukariot. Sebagai contoh untuk menjaga sel darah merah sendiri, pada manusia, tiap-tiap individu pembelahan selnya rata-rata mengalami lebih dari dua juta per detik.



**Gambar 11.8**

Fragmoplas dan Formasi Pembentukan Dinding Sel Tumbuhan  
(Dok. Penulis)

## C. Pembelahan secara Meiosis

Proses dari pembelahan sel meiosis menjamin bahwa nukleus dihasilkan oleh mekanisme yang berupa ciri-ciri genetik. Selama pembentukan sel telur dan sperma dalam reproduksi seksual, merupakan sebuah bentuk modifikasi dari pembelahan nukleus. Tidak satupun nukleus yang dihasilkan oleh mekanisme pembelahan secara gen yang sama. Meiosis mempunyai tujuan; (1) mengurangi jumlah kromosom dalam gamet, menjadi setengah, (2) terjadi proses yang disebut rekombinasi percampuran genetik dari induk sel kedalam kombinasi yang baru.

Meiosis hanya terjadi dalam organisme yang diploid atau mempunyai kromosom yang berpasangan. Sebagai contoh manusia ada 23 pasang kromosom yang berbeda. Jadi sel tubuh manusia mengandung jumlah total 46 kromosom. Pada fase meiosis terjadi pengurangan jumlah kromosom dengan memisahkan pasangan-pasangannya, karena hanya setengah dari jumlah kromosom dalam sel tubuh disebut haploid atau monoploidi sel telur dan sel sperma manusia mengandung 23 kromosom, jumlah haploid untuk yang sejenis. Tiap kromosom dalam sel tubuh yang diploid terbagi atas sebuah molekul DNA mengandung rangkaian bagi molekul-molekul mRNA, rRNA dan tRNA. Tiap koding rangkaian satu kromosom, dua anggota gen tiap kromosom adalah diploid mengandung gen-gen yang sama dan fungsi tugas yang sama. Oleh karena itu disebut kromosom homolog.

Walaupun dua dari homolog mengandung gen yang sama mungkin mereka berbeda dalam rangkaian ikatan nukleus, pada gen yang diberikan dalam kromosom lain. Rangkaian

ikatan nukleus yang berbeda ini disebut alel dari sebuah gen. Jika mRNA untuk protein dituliskan dari alel yang berbeda (perbedaan dalam gen rRNA dan tRNA jarang terjadi) mRNA akan keluar, rangkaian perbedaan ini bisa menghasilkan rangkaian asam amino yang berbeda dalam sintesis protein sesuai dengan pengkodean mRNA. Efek dari rekombinan dan mitosis adalah bercampurnya alel dari dua kromosom yang homolog ke dalam kombinasi baru. Ini berawal dari bermacam tipe genetik yang digerakkan pada meiosis. Dalam meiosis replikasi tunggal diikuti oleh dua pembelahan tunggal dari kromosom dengan hasil jumlah kromosom merupakan produk pembelahan, setelah interfase proses meiosis menghasilkan dua kali pembelahan kromosom yang lengkap.

## 1. Meiosis I

### a. Profase I

Dua rangkaian pembelahan meiosis pada dasarnya mirip dengan pembelahan sel mitosis. Tahap profase pada meiosis pertama lebih rumit daripada profase mitosis karena bertujuan untuk mengurangi jumlah kromosom dan rekombinasi genetik. Profase I dibagi kedalam lima tahap berdasarkan aktifitas kromosom, yaitu :

- Kondensasi (leptotene)
- Berpasangan (zygotene)
- Rekombinasi (pachytene)
- Transkripsi (diplonema)
- Rekondensasi (diakinesis)

### **1) Tahap Kondensasi (leptotene)**

Merupakan suatu periode dimana nukleus mulai membesar ukurannya dan kromosom memendek menjadi benang yang tampak. Dalam mekanisme kondensasi seperti dalam profase mitosis, fiber kromosom menjadi lebih pendek, struktur lebih kompak menjadi lebih tebal. Pada kromosom leptotene duplikasi telah terjadi dan mempunyai dua kromatid, kromosom-kromosom ini terlihat menebal seperti butiran-butiran (manik-manik) dan disebut kromonema yang tampak tidak teratur sepanjang bentuknya. Tiap kromosom tersebut mengandung dua kromatin, dari replikasi DNA selama interfase pra-meiosis.

### **2) Tahap Berpasangan (zygotene)**

Tahap kondensasi berubah ke tahap berpasangan (Zygotene). Dua kromosom dari tiap pasangan homolog akan berjajar “berdampingan”. Mekanisme perpasangan ini disebut sinapsis, sinapsis merupakan ciri khas dari meiosis, proses berlanjut pasangan homolog berderet berdampingan. Homolog yang berpasangan ini disebut bivalen. Kromosom homolog, identik dalam ukuran dan bentuknya, mempunyai kromosom yang identik dan mengandung faktor hereditas atau gen yang sama.

### **3) Tahap Rekombinasi (pachytene)**

Tahap rekombinasi (pachytene) adalah tahap pada saat seluruh kromosom homolog telah berpasangan. Setiap pasangan kromosom terdiri dari dua kromatid, hasil dari replikasi selama interfase meiosis. Kemudian semuanya empat kromatid membentuk tetrad. Sentromer tidak

membelah, karena itu hanya terdapat dua sentromer untuk empat kromatid pada tiap tetrad. Walaupun sinapsis dari homolog-homolog itu sangat rapat dalam fase ini, dua kromosom dari setiap kelompok hanya dipisahkan oleh ruang dengan jarak sekitar 0,15 s.d 0,2 mikrometer. Ruang ini yang masih terlihat oleh mikroskop cahaya membuktikan bahwa di bawah mikroskop elektron mengandung struktur khusus yang disebut *synaptonemal kompleks*.

Rekombinasi genetik diperlihatkan diantara empat kromosom homolog. Selama pachyten dua kromatid dari homolog bertukar segmen-segmennya (rekombinasi). Peristiwa ini diikuti oleh pertukaran dan peleburan akhir dari segmen kromatid. Synaptonemal kompleks, memungkinkan membantu kromatid-kromatid dalam konfigurasi penutupan dan juga oleh pengisian enzim diperlukan untuk perbaikan dan mekanisme pergantian.

#### 4) Tahap Transkripsi (diplonema)

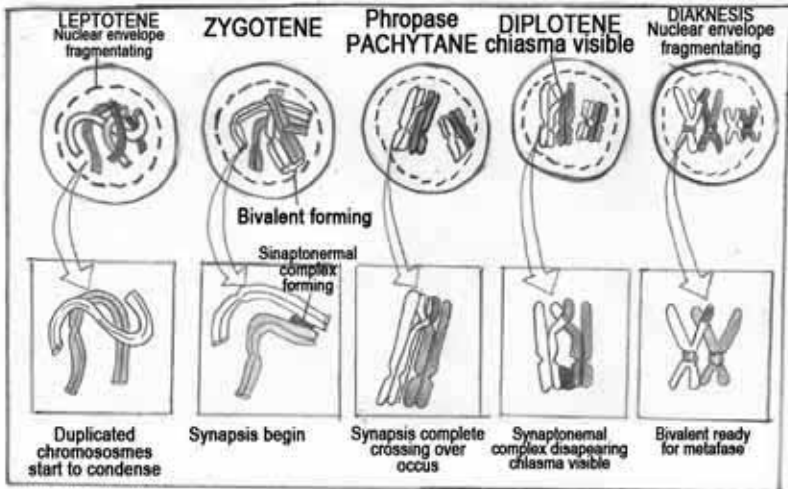
Ketika fase rekombinasi (pachytene) mendekati selesai, pasangan kromosom homolog merenggang dan berpisah. Fase akhir ini menutup sinyal-sinyal perpasangan dan memulai fase transkripsi (diplotene). Ketika homolog-homolog berpisah, synaptonemal kompleks menghilang dari kromosom. Walaupun pemisahan belum lengkap, sebab kromosom homolog masih disatukan oleh khiasmata, sebagai tempat *crossing over* atau rekombinasi. Selama fase transkripsi, yaitu RNA messenger, transfer dan RNA ribosom. Volume sel bertambah melalui sintesa protein, lemak, karbohidrat dan molekul-molekul lain yang kompleks dengan perkembangan sel telur, dalam beberapa spesies



berdiameter mencapai beberapa sentimeter. Setelah transkripsi dan sintesis sitoplasma sempurna, kromosom berkondensasi menjadi pendek, tebal seperti dalam tahap rekombinasi akhir (diakinesis) dari profase meiosis.

#### **5) Tahap Rekondensasi (diakinesis)**

Pada diakinesis kromosom kembali berkontraksi, tetrad lebih rata tersebar dalam nukleus dan nukleolus menghilang. Selama periode ini khiasmata berkurang. Fase diakinesis menandai berakhirnya profase meiosis I, peristiwa-peristiwa pada profase I menghasilkan 3 hal yang penting dalam meiosis; (1) rekombinasi (2) sintesis RNA, protein, lipid dan molekul karbohidrat yang dibutuhkan untuk pertumbuhan gamet dan tahap awal perkembangan embrio dan (3) kondensasi kromosom menjadi benang-benang pendek. Tahap akhir dari meiosis, pembelahan kromosom menjadi haploid, sebelum akhir dari profase meiosis I, bentuk spindle sama dengan mitosis. Pada tahap rekondensasi dari profase I hampir sempurna, membran inti dan tetrads anaknya menyebar karena rusaknya membran inti, membuat gerak ke spindle kurang lancar. Tahapan profase 1 disajikan pada gambar 11.9.



Gambar 11.9. Tahapan Profase (Dok. Penulis)

b. Metafase I

Perbedaan utama antara pembelahan mitosis dengan meiosis adalah terdapatnya tetrad yang melekat pada spindle mikrotubul-mikrotubul pada metafase I. Setiap pasangan kromosom homolog mempunyai dua kinetokor, setiap kinetokor untuk dua kromatid. Walaupun kedua kinetokor itu ada di setiap kromosom homolog, keduanya menghubungkan ke kutub yang sama dari spindle pada metafase I. Dua kinetokor dari kromosom homolog lain, menghubungkan ke kutub pasangannya.

c. Anafase I

Pembagian pasangan kromosom homolog oleh spindle memprakarsai terjadinya anafase I. karena hubungan kinetokori, pergerakan pada tahap awal anafase memisahkan

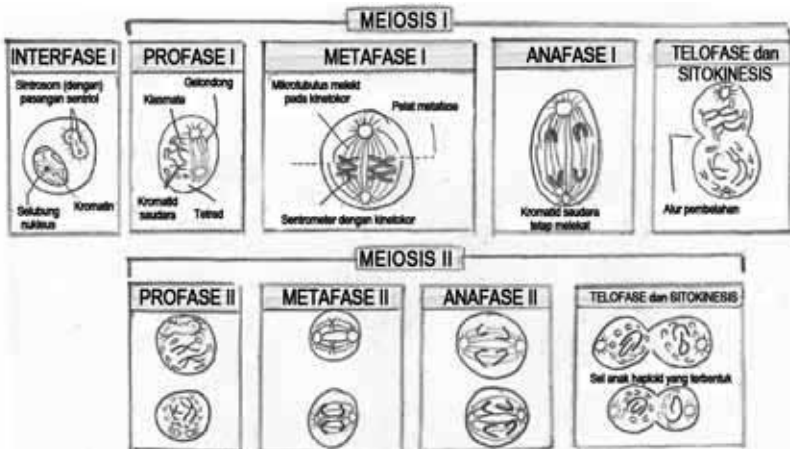
dua kromosom dari setiap pasangan kromosom homolog dan menuju ke kutub yang berlawanan. Anafase I, menghasilkan kromosom yang haploid. Setiap kromosom masih rangkap dan mempunyai dua kromatid (dari replikasi selama interfase). Susunan dari hubungan kinetokor menghasilkan pembagian kromosom selama anafase I yang disempurnakan di meiosis kedua, reduksi jumlah kromosom yang haploid.

#### d. Telofase I

Telofase I pada tahap meiosis selalu terjadi diantara anafase I dan pembelahan meiosis II. Kemungkinannya ditemukan secara alami, selama telofase I dari semua spesies, pemisahan spindel tunggal metafase I dan penyusunan kembali menjadi dua spindel yang terbentuk pada kutub kumparan telofase I. Hal ini melengkapi proses pembelahan meiosis II.

## 2. Meiosis II

Pembelahan meiosis II memiliki pola yang sama dengan pembelahan pada mitosis biasa. Setelah profase II, kromosom meninggalkan kedua belah kutub pada pembelahan meiosis I ke tengah-tengah kumparan yang baru. Pada tahap ini setiap kromosom mengandung dua kromatid, kinetokor kromatid ini menempel pada mikrotubulus menuju ke kutub yang berlawanan seperti pada mitosis. Pada anafase II, kromatid dari setiap kromosom, memisah dan bergerak ke kutub spindel yang berlawanan. Pemisahan dan pergerakan ini mengantarkan jumlah kromatid yang haploid ke setiap kutub-kutub dari spindel. Kromosom haploid hasil 2 pada gambar 11.10.



Gambar 11.10. Tahap-tahap Meiosis 1 dan Meiosis 2  
(Bruce Albert, 1997. Gambar ulang oleh Penulis)

## D. Pertanyaan Diskusi

1. Jelaskan fungsi sentrosoma pada fase mitosis!
2. Jelaskan fungsi mitosis dan meiosis!
3. Bagaimana perbedaan mendasar bentuk kromosom pada setiap fase mitosis?
4. Jelaskan perbedaan antara mitosis dan meiosis!
5. Jelaskan perbedaan mendasar antara sitokinesis sel hewan dan sel tumbuhan!



# Sel-Sel Penghasil Keturunan

## A. Pendahuluan

Gamet bukan satu-satunya alat reproduksi. Organisme-organisme bersel tunggal dapat bereproduksi dengan pembelahan mitosis sederhana, dan kebanyakan tumbuhan berkembang biak secara vegetatif dengan membentuk bagian-bagian multiseluler yang nantinya terpisah dari induknya.

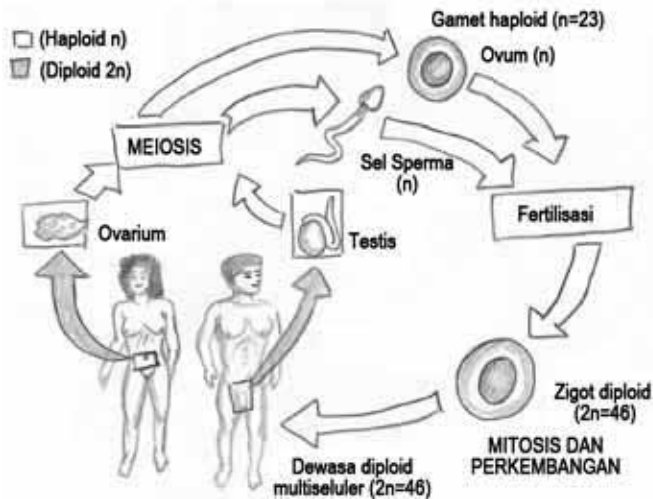
Pada reproduksi aseksual yang sederhana, keturunannya secara genetik identik dengan induknya. Pada reproduksi seksual melibatkan peleburan genom dari dua individu untuk menghasilkan keturunan yang berbeda secara genetik dengan induknya. Reproduksi ini tampaknya mempunyai keuntungan-keuntungan yang besar.

Organisme yang bereproduksi secara seksual melakukan proses yang membagi dua jumlah kromosom dalam gamet. Proses ini merupakan pembagian sel yang dinamakan meiosis, dan pada hewan hal ini terjadi pada indung telur

atau sperma. Mitosis mempertahankan jumlah kromosom, sedangkan meiosis mengurangi jumlah kromosom menjadi separuhnya. Sebagai hasilnya, sperma dan indung telur manusia mempunyai set haploid yang terdiri dari 23 kromosom yang berbeda. Fertilisasi memulihkan kembali kondisi diploid, dan siklus hidup manusia berulang kembali, dari generasi ke generasi.

Fertilisasi dan meiosis saling bergantian dalam siklus hidup seksual, mengimbangi pengaruh masing-masing pada jumlah kromosom, dengan demikian membuat jumlah kromosom suatu spesies tetap.

Keragaman siklus kehidupan seksual, meskipun kemunculan bergantian antara meiosis dan fertilisasi ini merupakan sesuatu yang lazim untuk semua organisme yang bereproduksi secara seksual, waktu terjadinya kedua peristiwa ini dalam siklus hidup bervariasi, tergantung pada spesiesnya. Variasi-variasi ini dapat dikelompokkan ke dalam tiga tipe utama siklus hidup. Siklus hidup manusia adalah satu contoh dari sebuah tipe, juga terdapat pada sebagian besar hewan. Gamet merupakan sel haploid. Meiosis terjadi selama produksi gamet, yang tidak mengalami pembelahan sel lagi sebelum fertilisasi. Kromosom zigot diploid, akan membelah diri secara mitosis, menghasilkan suatu organisme multiseluler yang diploid.



Gambar 12.1

Siklus hidup manusia. Jumlah kromosom dalam setiap sel haploid adalah 23 ( $n = 23$ ); jumlah kromosom dalam zigot diploid dan semua sel somatik yang berasal dari zigot. (Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

## B. Keuntungan Reproduksi Seksual

Siklus reproduksi seksual melibatkan alternatif penyusunan sel haploid, masing-masing membawa seperangkat kromosom tunggal. Rekombinasi genom dicapai dengan peleburan/penggabungan dua sel haploid untuk membentuk sel diploid. Setelah itu, sel-sel haploid baru dihasilkan ketika sel-sel diploid tersebut terbelah melalui proses meiosis.



Selama meiosis kromosom-kromosom ganda bertukar DNA dengan gabungan rekombinasi baru ke dalam kromosom tunggal. Melalui cara ini setiap sel haploid baru menerima bermacam-macam gen baru, beberapa gen pada setiap kromosom berasal dari satu sel induk haploid sebelumnya dan beberapa dari yang lainnya. Oleh karena itu, melalui siklus haploid terjadi penggabungan menjadi sel diploid dan terjadi meiosis baru lagi.

1. Pada hewan multiseluler fase diploid sangat kompleks dan lama sedangkan pada fase haploid sederhana dan cepat

Sel berkembang biak melalui pembelahan mitosis. Organisme yang bereproduksi secara seksual, perkembangbiakan ini terjadi selama fase diploid. Pada beberapa organisme primitif, sel-sel haploid dan sel duplikat berkembang biak secara mitosis. Pada tumbuhan, terjadi pembelahan sel mitosis baik dalam fase haploid dan diploid, tapi pada kebanyakan tumbuhan primitif, fase haploid sangat cepat dan sederhana, sementara fase diploid merupakan periode yang panjang dari perkembangbiakan. Pada hampir keseluruhan hewan multiseluler, termasuk vertebrata, seluruh siklus hidup melalui fase diploid, sel-sel haploid khusus untuk penggabungan seksual.

Sel-sel haploid yang khusus untuk peleburan sel disebut gamet. Secara khusus dua jenis gamet terbentuk, salah satu berukuran besar dan nonmotil yang bertindak sebagai ovum, yang lainnya berukuran kecil dan motil yang bertindak sebagai spermatozoa.

Selama fase diploid, sel-sel berkembang biak untuk membentuk organisme multiseluler kompleks. Pada kebanyakan hewan, perbedaan yang jelas dapat dilihat antara sel-sel penghasil keturunan (*germ line*), dimana generasi gamet baru diperoleh, dari sel-sel somatik. Sel-sel somatik hanya membantu sel-sel *germ line* bertahan dan berkembang biak.

## 2. Reproduksi Seksual Memberikan Keuntungan Kompetitif pada Organisme

Melalui seksual, rekombinan individu mengembangkan keturunan yang tidak sama dan tidak bisa diperkirakan. Perubahan susunan gen dalam reproduksi seksual membantu spesies bertahan dalam lingkungan. Jika induk menghasilkan banyak keturunan dengan variasi kombinasi gen, terdapat kesempatan yang lebih baik, setidaknya dari satu keturunan tersebut akan mempunyai bermacam-macam rekombinan yang penting untuk bertahan.

Salah satunya dapat menjelaskan bagaimana langkah pertama evolusi harus terjadi. Evolusi tergantung pada banyaknya kompetisi diantara individu yang membawa *allele* alternatif, atau varian yang dibentuk melalui mutasi gen-gen tertentu. Dua individu dalam populasi masing-masing mengalami mutasi yang mempengaruhi *lokus genetik* yang berbeda dan fungsi yang berbeda.

Pada spesies aseksual, masing-masing individu akan memperbanyak kloni dari progeni mutan, dan dua kloni akan bersaing satu dengan lainnya. Satu dari dua mutasi akan menyebar melalui populasi, sementara yang lainnya

akan hilang. Tetapi seandainya dari mutan asal hanya satu mengembangkan mekanisme secara genetik yang memungkinkannya untuk menggabungkan gen-gen dari sel lainnya. Selama masa persaingan, gen-gen dari sel kloni yang bersaing akan membentuk sel yang membawa mutasi yang berguna. Mutasi sel itu akan berhasil, dan keberhasilan itu akan menjamin perkembangbiakan karakter yang memungkinkannya untuk menggabungkan gen-gen dari sel lainnya.

Seluruh organisme kompleks saat ini telah berkembang secara luas melalui reproduksi seksual dibanding dengan reproduksi aseksual. Organisme-organisme aseksual, walaupun banyak, tampaknya tetap sederhana dan primitif. Mekanisme seluler reproduksi seksual, dimulai dengan peristiwa meiosis, dimana kombinasi ulang genetik terjadi dan sel-sel diploid dari sel-sel pembawa keturunan untuk menghasilkan gamet-gamet haploid. Kemudian gamet-gamet itu akan melakukan proses fertilisasi, yaitu akan melebur untuk membentuk organisme diploid yang baru.

## C. Meiosis

Sel-sel haploid dihasilkan oleh jenis sel khusus, berasal dari kromosom pembawa informasi genetik. Penemuan menjelaskan bahwa sel-sel penghasil keturunan harus dibentuk oleh sel khusus pembelahan inti. Jenis pembelahan ini disebut meiosis, berasal dari bahasa Yunani yang berarti pengurangan/penyusutan.

## 1. Spermatogenesis dan oogenesis melibatkan meiosis

Spermatogenesis, atau produksi sel-sel sperma dewasa, adalah proses yang terus-menerus dan prolifik pada jantan dewasa. Setiap ejakulasi laki-laki mengandung 100 sampai 650 juta sel sperma, dan seorang laki-laki dapat mengalami ejakulasi setiap hari dengan kemampuan untuk membuahi yang hanya berkurang sedikit.

Struktur sel sperma sesuai dengan fungsinya. Pada sebagian besar spesies, kepala yang mengandung nukleus haploid ditudungi oleh akrosom, yang mengandung enzim yang membantu sperma menembus sel telur. Di belakang kepala, sel sperma mengandung sejumlah besar mitokondria (atau sebuah mitokondria yang besar, pada beberapa spesies) yang menyediakan ATP untuk pergerakan ekor, yang berupa sebuah flagela. Bentuk sperma mamalia bervariasi dari spesies ke spesies, dengan kepala berbentuk koma tipis, berbentuk oval, atau berbentuk hampir bulat. Spermatogenesis terjadi dalam tubula seminiferous testis.

Oogenesis adalah perkembangan telur (sel telur dewasa yang belum dibuahi). Diantara kelahiran dan pubertas, sel-sel telur (oosit primer) membesar, dan folikel di sekitarnya tumbuh. Oosit primer mereplikasi DNA dan memasuki profase I meiosis, tetapi tidak berubah lebih lanjut kecuali diaktifkan kembali oleh hormon. Mulai saat pubertas, FSH (*follicle-stimulating hormone* atau hormon perangsang folikel) secara periodik merangsang sebuah folikel untuk memulai pertumbuhan sekali lagi dan menginduksi oosit primernya untuk menyelesaikan pembelahan meiosis

pertama. Meiosis kemudian berhenti sekali lagi, oosit sekunder yang dibebaskan selama ovulasi, tidak mengalami pembelahan meiosis kedua dengan seketika. Pada manusia, penetrasi sel telur oleh sperma memicu pembelahan meiosis kedua, dan setelah itulah oogenesis menjadi sempurna.

Oogenesis berbeda dari spermatogenesis, selama pembelahan meiosis oogenesis, sitokinesis bersifat tidak sama (*unequal*), dengan hampir semua sitoplasma dimonopoli oleh satu sel anak, yaitu oosit sekunder. Sel besar tersebut dapat terus berkembang menjadi ovum, produk lain meiosis yaitu sel yang lebih kecil yang disebut badan polar (*polar body*) akan mengalami degenerasi. Sementara sel-sel asal sperma berkembang terus membelah melalui mitosis sepanjang hidup laki-laki, hal ini tidak berlaku bagi oogenesis pada betina. Saat lahir, ovarium telah mengandung semua sel yang akan berkembang menjadi telur. Oogenesis mempunyai periode “istirahat” yang panjang, berlawanan dengan spermatogenesis, yang menghasilkan sperma dewasa dari sel perkursor dalam urutan yang tidak berhenti.

## 2. Keterkaitan yang Komplek pada Hormon-Hormon Reproduksi

Pada jantan, hormon kelamin utama adalah androgen, yang paling penting diantaranya adalah testosteron. Androgen, hormon steroid yang sebagian besar dihasilkan oleh sel-sel Leydig testis, secara langsung bertanggung jawab atas karakteristik seks primer dan sekunder jenis kelamin jantan. Karakteristik seks primer adalah tanda-tanda

yang berkaitan dengan sistem reproduksi, yang meliputi perkembangan vas deferens termasuk duktus-duktus lain, perkembangan struktur reproduksi eksternal, dan produksi sperma. Karakteristik seks sekunder adalah ciri yang secara tidak secara langsung berkaitan dengan sistem reproduksi, yang meliputi perubahan suara menjadi besar, persebaran rambut di muka dan pubis, dan pertumbuhan otot. Androgen juga menjadi penentu kuat perilaku pada mamalia dan vertebrata lain. Hormon dari pituitari anterior dan hipotalamus mengontrol sekresi androgen maupun produksi sperma oleh testis.

Pada betina, pola sekresi hormon dan berbagai peristiwa reproduktif yang diatur oleh hormon terjadi secara siklus. Pengontrolan siklus betina sangat kompleks.

Beberapa tahap meiosis sangat menyerupai tahap-tahap yang terdapat pada mitosis. Meiosis seperti halnya mitosis, didahului oleh replikasi kromosom. Namun, replikasi tunggal ini diikuti oleh dua pembelahan sel yang berurutan yang disebut meiosis I dan meiosis II. Pembelahan ini menghasilkan empat sel anak, masing-masing hanya mempunyai setengah dari jumlah kromosom sel induk.

## D. Telur

Pada semua embrio vertebrata, sel-sel tertentu dipilih pada awal perkembangan sebagai progenitor dari gamet-gamet. Sel-sel penghasil keturunan primordial berpindah pada gonad-gonad yang sedang berkembang, yang disebut *genital ridges*, yang akan membentuk ovarium pada betina dan testis pada jantan. Setelah periode perkembangbiakan

mitosis, sel-sel tersebut mengalami meiosis dan dibedakan kedalam gamet-gamet matang baik telur ataupun sperma. Kemudian, peleburan telur dan sperma setelah perkawinan memulai embriogenesis, dengan produksi dalam embrio sel-sel penghasil keturunan primordial, yang memulai kembali siklus.

## 1. Sel Telur Dapat Berkembang menjadi Individual Baru

Telur adalah sel-sel hewan yang paling dapat dikenali, ketika diaktivasi mereka dapat membentuk individu baru yang lengkap dalam beberapa hari atau minggu. Tidak ada sel lain pada hewan tingkat tinggi mempunyai kapasitas ini. Aktivasi biasanya merupakan konsekuensi dari fertilisasi penggabungan sperma dengan telur. Telur dapat diaktivasi dengan variasi penanganan fisik atau kimia yang tidak spesifik, contohnya telur katak dapat diaktivasi dengan menusuknya dengan jarum. Beberapa organisme, bahkan termasuk beberapa vertebrata seperti kadal, secara normal bereproduksi dari telur yang dapat diaktivasikan tanpa adanya sperma yang disebut secara parthenogenetikal.

Walaupun telur dapat merupakan jenis sel pada organisme dewasa (yaitu *totipotent*), telur merupakan sel khusus yang dibutuhkan untuk fungsi tunggal membuat individu baru.

## 2. Telur Berkembang dengan Cadangan Nutrisi yang Banyak dan Selubung yang Rumit

Telur dari kebanyakan hewan mempunyai sel-sel raksasa yang mengandung cadangan dari seluruh zat-zat yang

diperlukan untuk perkembangan awal dari embrio melalui tahapan dimana individu baru dapat mulai berkembang-biak. Sebelum tahapan ini, sel raksasa tunggal membelah ke dalam banyak sel yang lebih kecil. Pada umumnya, telur berbentuk bulat atau lonjong, dengan diameter sekitar 100  $\mu\text{m}$  pada manusia, 1 mm – 2 mm pada katak dan ikan, dan beberapa sentimeter pada burung dan reptil. Kebalikannya, sel somatik mempunyai diameter hanya sekitar 10 atau 20  $\mu\text{m}$ .

Selubung telur adalah ciri khusus lain dari telur. Selubung telur adalah bentuk khusus dari matrik ekstraseluler yang mengandung banyak molekul-molekul glikoprotein, beberapa dikeluarkan oleh telur dan yang lainnya oleh sel-sel yang mengelilinginya. Pada kebanyakan spesies selubung utama merupakan suatu lapisan yang mengelilingi membran plasma telur, pada telur non mamalia seperti ayam, disebut lapisan *vitelline*, sedangkan pada telur mamalia disebut *zona pellucida*. Lapisan tersebut melindungi telur dari kerusakan mekanik, dan pada kebanyakan telur bertindak sebagai penghalang spesies khusus untuk sperma.

Telur mamalia mempunyai lapisan tambahan yang dikeluarkan oleh sel-sel disekelilingnya. Contoh pada telur katak, sebelum melewati ovari melalui oviduk (tube yang menyalurkan telur untuk keluar), telur mendapatkan beberapa lapisan selubung gelatin yang dikeluarkan oleh sel-sel epitel. Putih telur (albumin) dan cangkang telur ayam terbentuk (setelah fertilisasi) ketika telur melewati oviduk. Lapisan vitelin dari telur-telur serangga ditutupi oleh lapisan tipis dan kuat yang disebut chorion yang dikeluarkan oleh sel-sel folikel yang mengelilingi setiap telur dalam ovari.



Telur (termasuk telur mamalia) mengandung gelembung khusus di bawah membran plasma pada daerah luar, atau korteks dari sitoplasma telur. Ketika telur diaktivasi oleh sperma granul kortikal melepaskan isinya oleh *exocytosis*, isi granul merubah selubung telur sehingga bisa mencegah lebih dari satu sperma yang akan melebur dengan telur.

### 3. Telur Berkembang dengan Tahapan-Tahapan

Telur yang sedang berkembang disebut oocyt. Oocyt mengembangkan mekanisme khusus untuk mengalami perkembangan melalui meiosis. Perkembangan oocyt/oogenesis (gambar 12.2) beragam pada spesies yang berbeda, tahapan-tahapan umumnya sama. Sel-sel penghasil keturunan primordial berpindah untuk membentuk gonad menjadi *oogonia*, yang berkembang biak lewat siklus pembelahan sel untuk periode sebelum dibedakan kedalam oocyt utama. Pada tahapan ini, pembelahan meiosis pertama dimulai, DNA bereplikasi sehingga setiap kromosom mengandung dua kromatid, kromosom-kromosom homolog berpasangan sepanjang sumbu panjangnya, dan perpindahan terjadi diantara kromatid kromosom-kromosom yang berpasangan tersebut. Setelah peristiwa ini sel-sel tetap pada profase pembelahan I meiosis untuk periode yang berlangsung dari beberapa hari hingga beberapa tahun, tergantung pada spesiesnya. Selama periode panjang ini, *oocyte* utama mensintesa selubung dan granul kortikal, dan pada kasus oocyt non mamalia yang besar, mereka mengakumulasi ribosom, kuning telur, glikogen, lipida, dan mRNA yang akan mensintesa protein yang dibutuhkan untuk perkembangan embrionik awal.

Fase berikutnya dari perkembangan oocyt disebut *pematangan oocyte* dan biasanya tidak terjadi hingga kematangan seksual, ketika distimulasi oleh hormon. Di bawah pengaruh hormonal sel-sel mengalami perkembangan melalui pembelahan meiosis I; kromosom berekondensi, nuclear envelope terpecah (biasanya hal ini sebagai tanda permulaan pematangan) dan kromosom-kromosom homolog terpisah pada anafase I kedalam dua anak inti, masing-masing mengandung setengah dari jumlah kromosom awal. Untuk mengakhiri pembelahan meiosis I, sitoplasma membelah secara simetrik untuk menghasilkan dua sel yang berbeda ukurannya, satu merupakan *polar body* yang kecil, dan satu lagi merupakan oocyt cadangan yang besar, yang merupakan prekursor telur. Pada tahap ini setiap kromosom masih tersusun dari dua kromatid bersaudara. Kromatid-kromatid ini tidak terpisah hingga pembelahan meiosis II. Setelah pemisahan kromosom akhir pada anafase II, sitoplasma dari oocyt cadangan kembali membelah secara asimetrik untuk menghasilkan telur yang matang (ovum) dan polar body, masing-masing dengan jumlah haploid dari kromosom tunggal. Karena dua pembelahan asimetrik dari sitoplasma tersebut, oocyt menjaga ukuran luasnya walaupun mengalami dua pembelahan meiosis.

Pada kebanyakan vertebrata, pematangan oocyt mengalami proses untuk metafase meiosis II dan kemudian bertahan hingga pembuahan. Pada ovulasi oocyt cadangan yang bertahan dikeluarkan dari ovarium, dan jika pembuahan terjadi, oocyt distimulasi untuk melengkapi meiosis.



**Gambar 12.2.** Oogenesis  
(Bruce Albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

#### 4. Perkembangan Oocyt

Sel somatik dengan diameter 10-20  $\mu\text{m}$  khususnya membutuhkan waktu 24 jam untuk menggandakan sel dalam persiapan pembelahan sel. Pada tingkat biosintesis ini, sel akan membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai ukuran besar, pada telur mamalia mencapai diameter 100  $\mu\text{m}$ . Jelas bahwa telur harus mempunyai mekanisme khusus untuk mencapai ukuran terbesarnya. Beberapa oocyt mempunyai panjang dan luas untuk mengumpulkan DNA ekstra.

Oocyt juga tergantung pada aktivitas sintesis dari sel-sel lain untuk pertumbuhannya. Kuning telur, biasanya disintesa di luar ovari dan dikirim kedalam oocyt. Pada burung, amphibi, dan serangga, protein kuning telur dibuat oleh sel-sel liver (atau yang serupa) yang mengeluarkan protein-protein tersebut kedalam darah. Ovari oocyt mengambil protein kuning telur dari cairan ekstraseluler

melalui penerima endositosis, bantuan nutritif dapat berasal juga dari sel-sel pelengkap, progeneri dari oogonia menjadi *nurse cells* sebelum menjadi oocyt. Sel-sel tersebut berhubungan dengan oocyt melalui jembatan sitoplasmik yaitu makromolekul dapat lewat secara langsung kedalam sitoplasma oocyt. Pada oocyt serangga, *nurse cells* menghasilkan ribosom mRNA.

Sel-sel pelengkap lainnya dalam ovarium yang membantu mengembangkan oocyt adalah sel-sel somatik biasa yang disebut sel folikel, yang ditemukan baik pada vertebrata maupun invertebrata. Sel-sel tersebut tersusun sebagai lapisan epitel yang mengelilingi oocyt.

## E. Sperma

Sperma, berfungsi untuk mengembangbiakan generasi jantan, bersifat motil dan mempunyai kecepatan tinggi dan bertugas untuk membuahi. Persaingan diantara spermatozoa tersebut sangat ketat, dan kebanyakan gagal untuk membuahi sel telur, walaupun jutaan sperma dilepaskan selama masih reproduksi pria, hanya beberapa yang dapat membuahi telur.

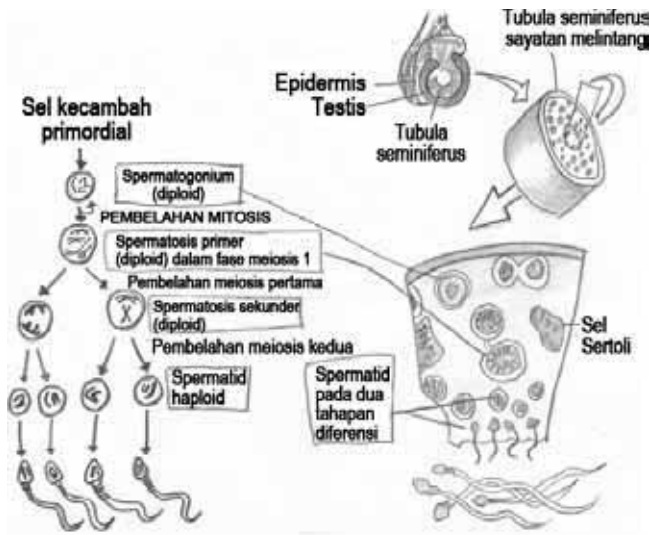
Sperma dilengkapi oleh flagellum yang kuat untuk mendorongnya pada media cair. Sperma mengandung banyak mitokondria yang terletak strategis. Ekor yang mendorong sperma menuju telur untuk membantu melubangi selubung telur, dan kepala yang mengandung inti haploid yang berkondensi.

Kepala sperma hewan mempunyai gelembung yang disebut gelembung akrosomal yang mengandung enzim-enzim hidrolitik yang membantu sperma menembus selubung luar telur. Ketika sperma mengenai telur, isi gelembung dilepas oleh eksositosis yang disebut *reaksi akrosomal*, pada beberapa sperma reaksi ini juga melepaskan protein-protein khusus yang membantu mengikat sperma kuat-kuat pada selubung telur.

Ekor motil dari sperma merupakan flagela panjang yang axoneme pusatnya berasal dari basal tubuh yang terletak pada posterior inti. Terdiri dari dua mikrotubul singlet pusat yang dikelilingi oleh sembilan doublet mikrotubul. Flagela dari beberapa sperma (termasuk mamalia) berbeda dari flagela lainnya dimana 9 + 2 pola axoneme dikelilingi oleh sembilan *serabut luar* yang tersusun sebagian besar dari keratin, serabut ini keras dan non kontraktil.

Gerakan flagela di dorong oleh protein-protein penggerak dinem, yang menggunakan energi dari hidrolisis ATP untuk menggerakkan mikrotubul, ATP dibuat oleh mitokondria khusus dalam bagian anterior ekor sperma (disebut *midpiece*), dimana ATP dibutuhkan.

**Sperma Dihasilkan secara Terus-Menerus pada Kebanyakan Mamalia**



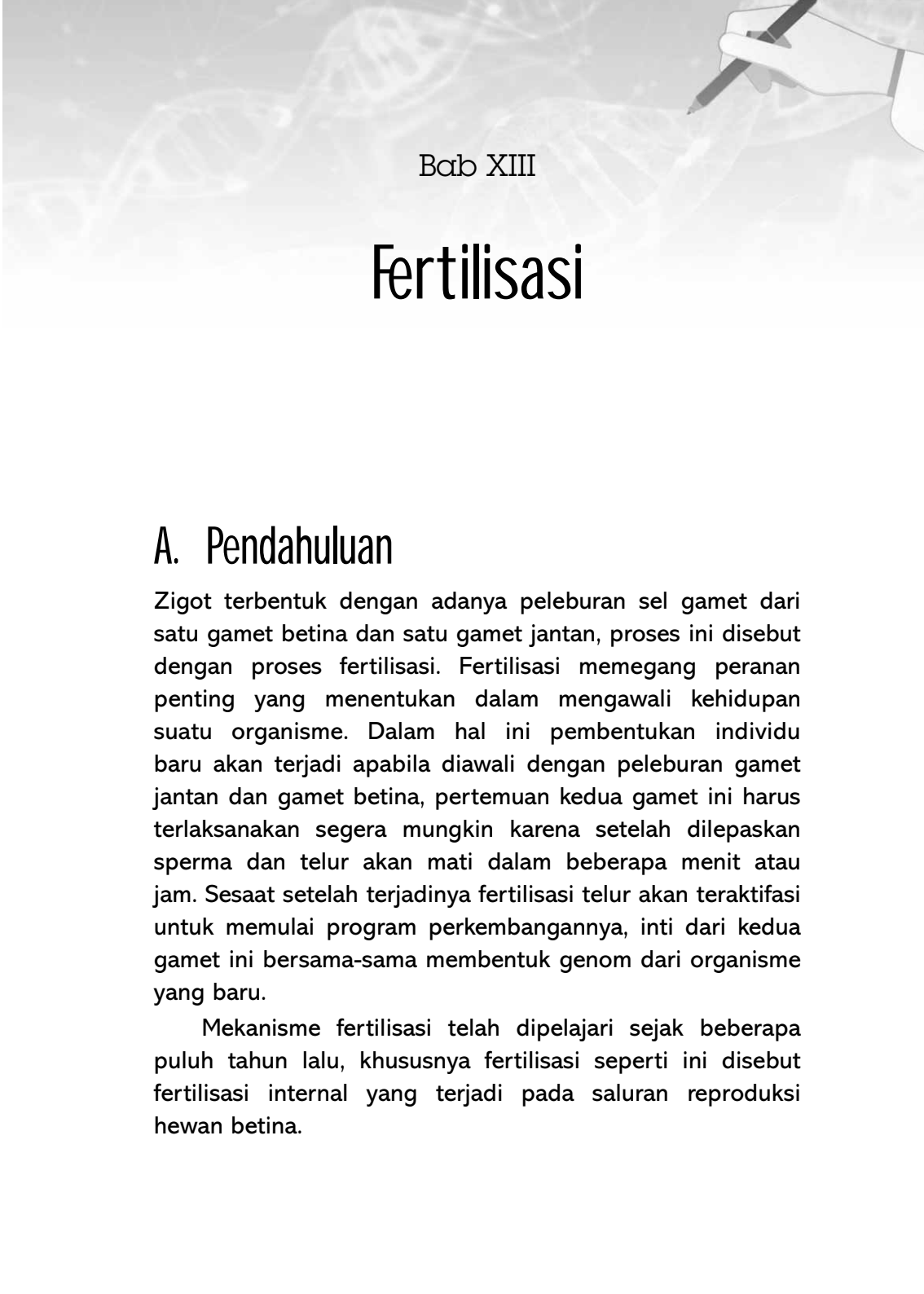
**Gambar 12.3.** Spermatogenesis  
(Bruce albert, 1994. Gambar ulang oleh Penulis)

Pada manusia, terdapat dua perbedaan utama pada oogenesis dan spermatogenesis. Pada pria, meiosis dan spermatogenesis tidak dimulai dalam testis hingga pubertas dan berlanjut dalam garis epitel dari tube yang panjang disebut *tubules seminiferous*.

Sel-sel penghasil keturunan yang belum matang, disebut dengan spermatogonia, terletak sekeliling sudut luar tube-tube tersebut dekat dengan lamina basal, dan berkembang biak secara terus menerus melalui siklus pembelahan sel biasa. Beberapa sel anak berhenti berkembang biak dan dibedakan kedalam *spermatocytes utama*. Sel-sel tersebut memasuki profase meiosis pertama, dimana kromosom-kromosom homolognya yang berpasangan.

## F. Pertanyaan Diskusi

1. Bagaimana hubungan antara meiosis dengan oogenesis dan spermatogenesis?
2. Jelaskan keuntungan dari reproduksi secara seksual!
3. Jelaskan tahap-tahap oogenesis!
4. Jelaskan tahap-tahap spermatogenesis!
5. Jelaskan perbedaan mendasar antara oogenesis dan spermatogenesis!



## Bab XIII

# Fertilisasi

### A. Pendahuluan

Zigot terbentuk dengan adanya peleburan sel gamet dari satu gamet betina dan satu gamet jantan, proses ini disebut dengan proses fertilisasi. Fertilisasi memegang peranan penting yang menentukan dalam mengawali kehidupan suatu organisme. Dalam hal ini pembentukan individu baru akan terjadi apabila diawali dengan peleburan gamet jantan dan gamet betina, pertemuan kedua gamet ini harus terlaksanakan segera mungkin karena setelah dilepaskan sperma dan telur akan mati dalam beberapa menit atau jam. Sesaat setelah terjadinya fertilisasi telur akan teraktifasi untuk memulai program perkembangannya, inti dari kedua gamet ini bersama-sama membentuk genom dari organisme yang baru.

Mekanisme fertilisasi telah dipelajari sejak beberapa puluh tahun lalu, khususnya fertilisasi seperti ini disebut fertilisasi internal yang terjadi pada saluran reproduksi hewan betina.



## B. Fertilisasi Eksternal dan Fertilisasi Internal

Pada hewan yang hidup di air dan pada hewan yang tidak mempunyai alat kopulasi, fertilisasi terjadi diluar saluran reproduksi hewan betina atau terjadi di lingkungan yang umumnya berupa lingkungan air. Fertilisasi seperti ini dikenal dengan fertilisasi eksternal.

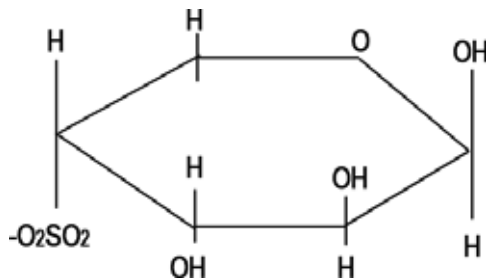
Peristiwa bertemu dan meleburnya sel gamet betina (telur) dan sel gamet jantan (sperma) pada fertilisasi eksternal mengalami beberapa hambatan sehingga sebagian kecil saja dari telur yang dapat dibuahi oleh sperma. Dalam hal ini sangat tergantung dari faktor lingkungan yang tidak selamanya menguntungkan. Bagi hewan yang fertilisasinya eksternal, Melepaskan sel telur dan sel sperma dalam jumlah yang cukup besar dengan demikian akan memperbesar peluang terjadinya fertilisasi.

Hal yang menarik dari fertilisasi eksternal adalah telur akan dibuahi oleh sperma dari jenis (*species*) yang sama meskipun di sekitarnya terdapat sperma dari berbagai jenis hewan, para ahli mencoba menyelidiki dan mengungkapkan tentang hal ini, untuk memecahkan masalah ini mereka berasumsi bahwa ada suatu mekanisme kimiawi yang terlibat. Menurut Balynsky (1981) membuat spermatozoa menjadi lengket dan menempel pada permukaan sel telur dan menyebabkan terjadinya pergumpalan.

Substansi yang menyebabkan hal ini terjadi adalah Fertilizin, zat ini diduga berada pada sitoplasma sel telur dan juga di dalam lendir yang menyelimuti sel telur.

Balynsky (1981) menjelaskan bahwa secara kimiawi fertilizin merupakan suatu glykoprotein atau mikopolysakarida sebagai protein ia mengandung beberapa asam amino, dan sebagai sakharida ia mengandung pula molekul monosakarida yang mengalami eksterifikasi oleh asam sulfat.

Struktur kimia dari fertilizin ditunjukkan oleh Balynsky (1981) sebagai berikut



**Gambar 13.1.** Struktur Kimia Fertilizin  
(Balinsky B.I, 1981. Gambar ulang oleh Penulis)

Perbedaan dalam asam amino dan gula menyebabkan fertilizin satu spesies berbeda dengan fertilizin spesies lainnya. Berat molekulnya sekitar 300.000, dan setiap molekul memiliki lebih dari satu bagian yang efektif sehingga dapat mengikat lebih dari satu sperma, permukaan dari sitoplasma spermatozoa memiliki substansi lainnya yaitu antifertilizin.

Pada fertilisasi internal diperlukan kerjasama antara hewan jantan dengan hewan betina melalui mekanisme koitus dengan demikian spermatozoa yang diejakulasikan kedalam saluran reproduksi hewan betina dapat segera

mencapai sel telur. Pencapaian spermatozoa kepada sel telur dibantu oleh gerak peristaltik dari uterus dan tuba falopii. Di dalam saluran vagina spermatozoa tidak dapat hidup terlalu lama karena lingkungannya sangat asam (pH 4,5), untuk mencegah hal ini seminal fluid yang dikeluarkan bersama-sama dengan sperma berperan dalam mengurangi keasaman.

Dengan struktur dari sel telur yang dikelilingi oleh mantel zona pelusida mekanisme fertilisasi menjadi sangat rumit, Balynsky (1981) menjelaskan adanya suatu enzim yang diproduksi oleh spermatozoa dari mamalia yaitu Hyaluronidase yang mampu memecahkan mukosaccharida dan asam hyaloronic sebagai substansi yang melekatkan sel-sel folikel, dengan enzim ini spermatozoa akhirnya dapat mencapai kloron radiata.

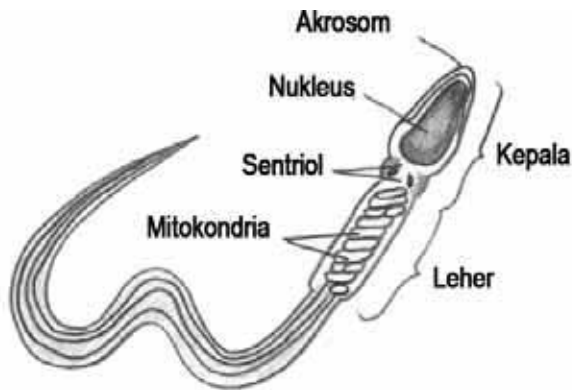
## C. Interaksi Sperma dan Sel Telur

### Struktur Sperma dan Sel Telur Sebelum Fertilisasi

Untuk mekanisme fertilisasi terlebih dahulu harus difahami mengenai struktur dari sperma dan sel telur yang merupakan aspek ultra struktural dan fertilisasi. Kepala dari sperma meliputi sebuah inti yang membawa informasi genetika dan komponen-komponen akrosom, bagian depan dari kepala sperma sangat berperan dalam melakukan penetrasi terhadap permukaan luar sel telur yang diselimuti oleh mantel dan juga berperan dalam melakukan hubungan dengan sitoplasma sel telur. Ditemukannya suatu protein yang dikenal dengan Bindin yang terdapat di kepala

sperma daerah acrosom, protein ini sangat penting dalam pengenalan dan penggabungan dengan permukaan sel telur. Struktur sperma dapat diamati pada gambar 13.2.

Bagian dari sperma yang penting lainnya adalah granula akrosomal yang mengandung enzim sperma lysin, enzim ini menurut Balynsky (1981) dapat memecahkan pembungkus telur pada tempat tertentu dan memberikan jalan bagi spermatozoa untuk mencapai permukaan telur.



**Gambar 13.2.** Struktur Sperma  
(Balynsky, 1981. Gambar ulang oleh Penulis)

Pada daerah leher dari sperma dapat diidentifikasi adanya mitokondria dan sentriol, peran mitokondria ini adalah untuk mensuplai energi bagi pergerakan sperma sedangkan sentriol berperan dalam pembentukan aster selama proses pembelahan (setelah telur dibuahi) khususnya proximal sentriol, dan distal sentriol berperan sebagai alat tambahan dari ekor sperma. Ekor sperma yang merupakan alat pergerakan tersusun dari mikro tubul yang dapat berkontraksi dan mengakibatkan perputaran sel sperma (Oppenheimer, 1980).

Struktur dari sel telur khususnya pembungkus yang menyelimuti telur merupakan peranan yang penting dalam interaksinya dengan sperma. Pada telur yang matang biasanya mantel lendir, membran vitelina atau juga terdapat unsur tambahan berupa sel-sel polikel (pada telur mamalia) yang disebut corona radiata.

Pada mamalia waktu fertilisasi, telur dilapisi 3 lapisan yaitu (dari luar kedalam): kumulus ooforus, korona radiata dan zona pelusida, 2 lapis pertama berupa sel-sel dalam matrik glikoprotein, dan lapisan ketiga merupakan mukopolisakarida, telurinya sendiri dilapisi oleh membran vitelina, terdapat ruangan antara membran vitelin dengan zona pelusida yang dikenal dengan ruangan perivitelin.

## D. Reaksi Zona

Pada telur mamalia terdapat zona pelusida yang merupakan lapisan penghalang, struktur zona pelusida akan berubah setelah sperma masuk, perubahan struktur zona pelusida dimulai dari tempat masuknya sperma kemudian meluas keseluruhan zona. Mekanisme ini merupakan salah satu upaya untuk menghalangi terjadinya fertilisasi polisemi.

### **Kapasitas**

Pada beberapa jenis hewan sel-sel spermatozoa harus mengalami suatu proses yang disebut kapasitas, yaitu kemampuan spermatozoa untuk memfertilisasi sel telur ini meliputi proses pembukaan reseptor, pelepasan inhibitor, atau stabilisator dari permukaan sperma. Menurut Balynsky

(1981) kapasitas melibatkan proses pemecahan dari membran yang menyelimuti acrosom dan melepaskan isi dari granula acrosom.

Dalam proses kapasitas terjadinya pelepasan inhibitor pelepasan proteinase yang berperan dalam mekanisme kerja dari enzim proteinase yang terdapat dalam acrosom. Proses ini berbeda-beda untuk tiap proses dan berlangsung dalam dua tahap. Tahap pertama terjadi di uterus dan tahap kedua berlangsung di dalam tubafalopi. Dalam hal ini para ahli menduga bahwa proses tersebut terjadi karena kontaknya sperma dengan cairan folikel yang dikeluarkan sewaktu ovulasi. Pada sperma mamalia hanya akan melanjutkan reaksi selanjutnya apabila telah dapat menyelesaikan reaksi kapasitas (Kenneth, 1983). Proses kapasitas pada sperma manusia terjadi selama 5-6 jam yang melibatkan perubahan komposisi glukoprotein membran plasma sperma serta kenaikan metabolisme dan motilitas sperma (Bruce Albert, 1994).

## 1. Mekanisma Fertilisasi

Untuk memahami apa yang sesungguhnya terjadi selama peristiwa interaksi antara sperma dan membran sel telur perlu dilakukan pengamatan melalui mikroskop elektron transisi V (TEM) karena dengan menggunakan TEM pengamatan terhadap sayatan ultra tipis dari sperma dan telur dapat memperlihatkan bagian interiornya meliputi membran, mantel dan sitoplasma, namun untuk melihat bagian sperma yang menempel pada permukaan sel telur digunakan mikroskop elektron scanning (SEM). Mekanisme

fertilisasi berjalan melalui beberapa tahapan yaitu reaksi akrosomal, reaksi sel telur, aktivitas sel telur dan aktivitas sperma di dalam sel telur.

## 2. Reaksi Akrosomal

Apabila sperma telah mengalami kapasitasi selanjutnya akan berpenetrasi terhadap lapisan sel-sel polikel yang kemudian akan berkaitan dengan zona pelusida, seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya bahwa zona pelusida tersusun oleh molekul glikoprotein khususnya pada mamalia terdapat tiga jenis gluko protein yaitu Zp1, Zp2, Zp3, yang mempunyai berat masing-masing 200.00, 120.00 dan 83.00 dalton (Kenneth, 1983). Zp2 dan Zp 3 menyusun menjadi filamen-filamen tersebut membentuk jaringan yang 3 dimensi. Zp3 berperan sebagai reseptor sperma yang bersifat spesies spesifik. Ikatan antara sperma dan zona pelusida difasilitasi oleh suatu molekul yang terdapat di permukaan kepala sperma yang mampu berikatan dengan rantai oligosacharida pada Zp 3.

Setelah terjadi ikatan sperma dengan zona pelusida, sperma terinduksi untuk melakukan tahap selanjutnya yaitu reaksi akrosomal dengan demikian pemicu reaksi akrosomal adalah Zp3 yang terdapat pada zona pelusida. Reaksi akrosomal diawali dengan peristiwa aksositosis yang melepaskan enzim hydrolitik dari vesicula akrosomal pada ujung kepala sperma. Enzim ini mampu melunakan lapisan mantel dan menyediakan jalan untuk proses reaksi akrosomal.

Akhir dari reaksi akrosomal adalah kontakannya sperma dengan membran plasma sel telur, yang kemudian terjadi peleburan kedua membran. Reaksi akrosomal segera diikuti oleh reaksi korteks dari telur.

### 3. Reaksi Sel Telur

Dalam mekanisme fertilisasi banyak sekali yang dapat berikatan dengan sel telur, namun secara normal hanya satu sperma saja yang berfungsi dengan sel telur dan memasukkan inti spermanya kedalam sitoplasma sel telur namun dalam kondisi tertentu mungkin saja terdapat lebih dari satu sperma yang membuahi sel telur, kondisi seperti ini dikenal sebagai *polyspermy*.

Menurut Bruce Albert. (1994) terdapat dua mekanisme yang berperan untuk menghindari terjadinya *polyspermy*. Pertama adalah reaksi depolirisasi membran plasma yang berlangsung sangat cepat pada saat terjadi fusi antara membran sel telur dengan membran plasma sperma yang pertama mekanisme ini dikenal "*Primary Block to Polyspermy*". Akan tetapi perubahan potensial membran ini akan segera kembali normal setelah fertilisasi, untuk menghindari *polyspermy* dibutuhkan mekanisme kedua yang sifatnya lebih permanen dikenal dengan "*Second Block to Polysperma*" reaksi kedua dari telur ini terjadi melalui reaksi kortikal sel telur.

Mekanisme reaksi vertikal sel telur lebih jauh yaitu sebagai berikut:

1. Membran keluar dakan melepaskan diri membentuk membran vitelin sehingga terlepas dari membran



plasma yang kemudian membengkak dan terbentuklah membran fertilisasi

2. Granula korteks akan pecah dan membentuk tiga buah komponen (badan berwarna gelap) yang kemudian bersatu membentuk membran dengan permeabilitas yang berbeda. Adanya perubahan permeabilitas ini disebabkan oleh reorganisasi komposisi molekuler dari membran sel.

Bruce Albert (1994) menjelaskan bahwa ketika sperma berdifusi dengan membran plasma sel, hal ini akan mengaktifasi jalur signal dalam sel telur yang berupa inositol phospholipid dll. Selanjutnya aktivasi signal di dalam sel ini meningkatkan ion  $Ca^{2+}$  dengan sitosol dengan adanya peningkatan  $Ca^{2+}$  menyebabkan granula kortikal melepaskan isinya melalui mekanisme eksositosis.

Enzim mucopolysaccarides dilepaskan dari reaksi kortikal menyebabkan perubahan pada struktur zona pelusida menjadi keras. Disamping itu, enzim ini menyebabkan penipisan dari perivitelin yang memisahkan membran plasma dengan membran vitelin. Mekanisme reaksi kortikal sel telur terjadi secara kimiawi dan berlangsung lambat sehingga sering disebut *slow block to polyspermy*.

#### 4. Afiksasi Sel Telur

Setelah sebuah sperma berpenetrasi dengan mantel ekstra sekunder dari sel telur, kemudian interaksi dengan membran plasma yang akhirnya akan diikuti oleh peleburan kedua membran. Peleburan dari sperma dan telur difasilitasi

oleh banyaknya mikrofil yang terdapat di permukaan sel telur, menurut Balynsky (1981) sebuah filamen akrosomal dari spermatozoa menyentuh permukaan sel telur maka akan terbentuk fertilisasi zone, Kenneth (1983) fertilisasi ini terbentuk dari sitoplasma sperma karena adanya pemanjangan filamen dari akrosomal.

Sperma telah berinteraksi dengan membran plasma sel telur yang diselimuti oleh mikrofil yang terdapat dipermukaan sel telur, mikrofil didekatnya mengalami pemanjangan dan pengelompokkan di sekitar sperma sehingga sperma dapat berdifusi dengan membran plasma sel telur. Fusi antara membran plasma sel telur dengan sel sperma diawali dengan terbentuknya tabung fertilisasi. Menurutny proses ini akan terlihat jelas dengan membengkaknya sitoplasma keluar pada tempat terjadinya kontak dan membentuk suatu tonjolan hyalin.

Terdapat suatu jenis protein yang berperan dalam peleburan membran plasma kedua gamet, protein ini ditemukan pada hamster yang dikenal dengan protein transmembran (PH 3). Selama reaksi akrosomal protein ini terekspos kepermukaan dari sperma dan diperkirakan berperan sebagai media yang mengikat sperma dengan membran plasma (Bruce Alberts, 1994).

Protein ini tersusun dari dua sub unit transmembran glycosilat. Kedua sub unit berikatan dengan ikatan kovalen. Daerah ekstraseluler mengandung wilayah hidropobik dari 20 residu asam amino, daerah ini menyerepuai daerah fusogenik dari firal fusion protein yang berperan sebagai media peleburan selubung virus dengan sel yang terinfeksi.

Asam amino sebagai ekstraseluler, sebagai daerah pangkal subunit dari pH 3 menyerupai suatu daerah yang ditemukan dari beberapa protein untuk dapat berikatan reseptor pada permukaan sel membantu sel hewan untuk dapat bergabung dengan matrik. Sub unit dari pH 3 berikatan dengan sebuah protein integrin pada membran plasma sel telur sehingga sperma dapat bergabung dengan permukaan sel telur sebagai persiapannya untuk berfusi.

Setelah terjadi peleburan membran sel sel telur mulai teraktisifasi untuk tumbuh dan berkembang menjadi embrio. Dengan masuknya inti sel sperma ke dalam sel telur terjadilah perubahan pertama yang tidak berhubungan langsung dengan pembentukan embrio. Peristiwa ini ditandai dengan meningkatnya konsumsi  $O_2$  hingga 500%, permeabilitas sel meningkat sehingga zat-zat dapat keluar masuk dengan mudah, perubahan psikologis lainnya adalah terjadinya metabolisme pembentukan purin, serta viscositas sitoplasma akan menjadi lebih pekat.

Setelah terjadinya fertilisasi, segera diikuti oleh perubahan metabolisme sel yang meningkat secara mendadak diantaranya adalah perubahan konsumsi oksigen, perubahan enzim dan akumulasi metabolit antar peningkatan sintesa protein, sedangkan menurut Oppenheimer (1980) terjadi pula pemasukan ion sodium, pembebasan ion kalsium dari intraseluler perubahan dari NAD menjadi NADP, kenaikan pH intraseluler pengaktifan sistem transfort, inisiasi sintesa DNA.

## E. Aktivitas Sperma dalam Sel Telur

Setelah fertilisasi sel telur disebut zigot, namun demikian suatu peristiwa fertilisasi akan lengkap apabila diikuti oleh peleburan dua inti haploid (pronuclei) serta menggabungkan kromosomnya menjadi sebuah inti yang diploid. Menurut Bruce Alberts (1994) pada fertilisasi mamalia peleburan kedua pronukleus tidak terjadi secara langsung seperti pada hewan lainnya. Pada mamalia kedua pronukleus berdekatan satu sama lainnya tapi tetap terpisah sampai membran masing-masing pronukleus pecah sebagai persiapan untuk pembelahan pertama.

Pada kebanyakan hewan termasuk manusia, kontribusi sperma terhadap zigot bukan hanya DNA namun juga sebuah sentriol yang memegang peranan penting dalam pembelahan sel serta dalam pendekatan pronukleus sperma dengan pronukleus sel telur. Pada beberapa hewan setelah terjadi peleburan dua gamet, nukleus dari sperma berputar  $180^\circ$  sehingga bagian posterior berputar ke arah depan bagian sperma yang lain terlepas dari nukleus dan sentrosom, pada saat ini nukleus sperma disebut pronukleus jantan. Melalui imbibisi dari sekitar cairan sitoplasma pronukleus menjadi vesikular. Pada saat yang sama sentrosom dikelilingi oleh aster (mirip aster pada pembelahan mitosis). Selama perubahan ini nukleus sperma beserta sentrosom bergerak kedalam sitoplasma sel telur mendekati daerah dimana tempat terjadinya fusi dengan pronukleus betina.

## Perubahan Fisiologis Akibat Fertilisasi

Setelah terjadinya fertilisasi maka dimulailah perubahan-perubahan fisiologis pada sel telur yang dibuahi. Berkaitan dengan hal ini Oppenheimer (1980) menyebutkan bahwa 30 detik setelah sel telur dan sperma berkaitan sebuah enzim NAD kinase diaktifkan untuk mengatalis perpindahan sebuah gugus fosfat dari ATP ke NAD untuk membentuk NADP, NAD dan NADP merupakan koenzim yang jumlahnya meningkat pada sel telur yang baru dibuahi.

Bersamaan dengan ini enzim lain teraktifasi yaitu glukose-6-phosphate dehydrogenase. Enzim ini sangat penting untuk menginisiasi reaksi metabolik khususnya metabolisme glukosa. Pada telur yang belum dibuahi enzim G-6-P-dehydrogenase terikat pada suatu fraksi dan diaktifkan dengan pelepasan dari suatu bagian sel.

Hal lain yang penting bagi perubahan fisiologi sel ini adalah bagaimana pengaruh fertilisasi terhadap sintesa, sedangkan pada sel telur yang tidak dibuahi hanya sedikit sekali mempunyai kemampuan mensintesa protein, sedangkan pada sel telur yang dibuahi mempunyai kromosom yang sangat aktif mensintesa protein.

Adapun faktor-faktor penyebab sintesa protein yang tiba-tiba pada sel telur yang dibuahi belum dipahami secara baik diduga hal ini melibatkan beberapa faktor yang teraktivikasi meliputi ribosom yang belum aktif, terdapatnya kofaktor baru (dapat berupa molekul kecil yang mungkin dibutuhkan untuk mengaktifkan suatu enzim atau reaksi), faktor yang lain adalah enzim, ion, aktivasi, mRNA atau tRNA, serta pengaktifan suatu enzim.

Berkaitan dengan penciptaan manusia bahwa manusia diciptakan Allah dari benih yang suci yang kemudian dikenal dengan sperma dan ovum. Dalam Al Qur'an surat al-Mu'minuun ayat 12 menyatakan bahwa manusia berasal dari inti sari tanah. Banyak sarjana muslim yang mengidentifikasi bahwa yang dimaksud saripati tanah adalah zat-zat yang terdapat pada sperma dan ovum. Telah disinggung sebelumnya bahwa makhluk hidup termasuk manusia tersesun dari molekul-molekul DNA. Struktur DNA terdiri dari basa nitrogen, gula deoksiribosa dan asam fosfat. Masing-masing terdiri dari carbon (C), hydrogen (H), dan oksigen (O). Struktur basa nitrogen (Adenin, Guanin, Sitosin, dan Timin) mengandung nitrogen (N), carbon (C), dan Hidrogen (H). Jadi, secara umum bahwa unsur yang menyusun DNA terdiri dari C,H, O, N, dan P. Kelima unsur ini dimungkinkan yang dimaksud adalah saripati tanah.

Sebenarnya, terdapat satu unsur lagi yang penting dalam menyusun tubuh manusia yaitu Sulfur (S) yang tidak terdapat dalam molekul DNA. Diprediksi bahwa sulfur ini terdapat pada saat perkembangan sesudah pembuahan. Dalam hal ini mungkin ada kaitannya dengan metionin dan sistein yang merupakan asam amino yang ditambahkan saat sintesis protein. Hal tersebut merupakan isyarat bahwa sulfur ditambahkan pada fase selanjutnya yaitu fase zigot. Protein inilah yang kemudian berkembang *melengkapi* sel yang baru sehingga pada fisiknya hampir semua protein mengandung sulfur baik metionin maupun sistein. Pada berbagai literature biokimia menyebutkan bahwa sel tersusun dari unsur C, H, O, N, S, dan P dan semua unsur tersebut terdapat pada tanah.

Pada perkembangan hasil fertilisasi terbentuklah darah, daging, dan tulang. Hal tersebut merupakan proses yang diciptakan Allah untuk melengkapi kimia tubuh manusia (Q.S. al-Mu'minuun : 14).

ثُمَّ خَلَقْنَا النُّطْفَةَ عَلَقَةً فَخَلَقْنَا الْعَلَقَةَ مُضْغَةً فَخَلَقْنَا الْمُضْغَةَ عِظْمًا فَكَسَوْنَا الْعِظْمَ لَحْمًا

ثُمَّ أَنْشَأْنَاهُ خَلْقًا آخَرَ فَبَارَكْ اللَّهُ أَحْسَنُ الْخَالِقِينَ ﴿١٤﴾

*“Dalam perkembangan selanjutnya, air mani itu Kami olah menjadi segumpal darah dan segumpal darah itu Kami olah menjadi segumpal daging. Lalu segumpal daging itu Kami olah menjadi tulang. Selanjutnya, tulang itu Kami bungkus dengan daging. Seterusnya Kami jadikan menjadi mahluk, berlainan dengan yang tadi. Maha Pemberi Restu Allah, Pencipta yang baik”.*

## F. Pertanyaan Diskusi

1. Apakah perbedaan fertilisasi internal dan eksternal ?
2. Bagaimana struktur sel telur dan sel sperma sebelum fertilisasi ?
3. Bagaimana proses sel sperma menembus sel telur ?
4. Bagaimana reaksi yang terjadi pada sel telur saat fertilisasi ?
5. Bagaimana aktivitas sel sperma dalam sel telur ?



# Daftar Pustaka

Alberts, B. et.al., (1994). *Molecular Biology of The Cell*. New York; Gerland Publishing, Inc.

Balinsky, B.I.,(1981). *An Introduction to Embriologi*, holt-Saunders International.

Bawa, W. (1988), *Dasar-Dasar Biologi Sel*, P2LPTK, Depdikbud, Jakarta.

Becker W. M. at. Al. (1996). *The world at the cell*, 3 rd ed. Menlo Park, CA Benjamin Eunningham.

Berkaloff, Andre. 1977. *Biologie et Physiologie Cellulaires*. Francis.

Campbell, N.A. and Reece, J.B. (2002). *Biology*. Edition 6<sup>th</sup> . San Francsisco: Pearson Education, Inc.

Claude, V. A., et all. (1999). *Zoologi Umum*, Edisi Keenam, Jilid 1. Jakarta : Penerbit Erlangga.



- Darnell, et. all., (1986). *Molecular Cell Biology*. Rockefeller Unievesity, New York, USA: Scientific American Books, Inc.
- Huetner. F. A., (1957). *Fundamental of Comparative Embryology of the Vertebrates*, New York : The Macmillan Company.
- Huff, S.L.A. (1978). *Junction Between Living Cells*. Scientific American, Inc. dalam buku *Histologi Dasar*.
- Issoegianti (1993). *Biologi Sel*, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Jakarta.
- Issoegianti (1994). *Biologi Sel*. Yogyakarta: Depdikbud, Dikti. Proyek Pembinaan dan Peningkatan Mutu Tenaga Kependidikan.
- Karp, Gerald. (2010). *Cell and Molecular Biology*. United State: John Wiley & Sons. Inc.
- Keeton, W.T. (1985). *Elements Of Biological Science*. Cornell University.
- Kenneth, M and Yamada (1983). *Cell Interaction and Development*, New York : A-Wiley-Interscience Publication Jhon Wiley abd Sons.
- Komball, J.W., *Biologi*, Edisi Kelima, Jilid I, Jakarta : Penerbit Erlangga.

- Marianti, A. Dan Sumadi (2007). *Biologi Sel*. Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Moore, Harry. D.M and Bed Ford J. Michael (1983). *Interaction of Mammalian Gamet in the Female, dalam Hartmann (ed), Mechanisme and Animal Fertilization*. New York : Academy Press.
- Muslim, C. (2003). *Biologi Molekuler Sel*. Bengkulu : Jurusan Biologi Universitas Bengkulu.
- Oppenheimer, S.B. (1980). *Introduction to Embryone Development*, Boston: Allyn and Baccon, Inc.
- Shahib, M. (2000). *Molekul Seluler Bertasbih*. Bandung : PT. Al Ma'arif.
- Soerodikoesoemo, Wibisono dan Sri Woelaningsih Sentosa (1987). *Anatomi Tumbuhan*, Jakarta : Karunika,
- Subowo (1995). *Biologi Sel*. Bandung : Angkasa.
- Sudarwati , S. (1993). *Biologi Perkembangan*, Bandung : PAU Bidang Ilmu Hayati ITB.
- Tarigan, J. (1988), *Pengantar Mikrobiologi*, P2LPTK, Depdikbud, Jakarta.
- Thalbah, H., dkk. (2008). *Ensiklopedia Mukjizat Al Quran dan Hadis*. Jakarta : PT. Sapta Sentosa.
- Thorpe, Neal O. (1984). *Cell Biology*. New York: John Wiley & Sons.

Winatasasmita, D. (1986). *Biologi Sel*, Jakarta : Karunika,

Wolfe, S.L. (1985). *Cell Ultrastructure*. University of California  
Davis USA: Wadworth Publishing Company Inc.

Yatim, W. (1987). *Biologi Modern : Biologi Sel*, Bandung:  
Tarsito.

# Tentang Penulis



**Dr. Hj. Tuti Kurniati, M.Pd.**, dilahirkan di Garut, Jawa Barat, 14 Agustus 1959. Pada tanggal 28 Mei 1982, penulis menyelesaikan Pendidikan Sarjana Strata (S1) pada Fakultas MIPA Pendidikan Biologi IKIP Bandung, dan berhasil menyelesaikan Pendidikan Magister (S2) pada Fakultas MIPA Pendidikan Biologi Universitas Pendidikan Indonesia Bandung pada tahun 2001. Kemudian melanjutkan studi pada Program Doktorat (S3), bidang ilmu MIPA-Biologi, Program Pascasarjana Universitas Padjadjaran Bandung.

Penulis mulai berkarier sebagai tenaga pengajar pada SMUN 16 Bandung tahun 1983. Kemudian sejak tahun 2001 diangkat sebagai staf pengajar Program Studi Pendidikan Biologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung, yang kemudian dipercaya menjadi Ketua Program Studi Pendidikan Biologi sejak tahun 2007 hingga 2015.

Mata kuliah pokok yang diajarkan sampai saat ini adalah Biologi Umum, Biologi Sel, Bioteknologi, dan Seminar

## Pendidikan Biologi.

Selain menghasilkan karya dalam bentuk buku, penulis juga telah berhasil menerbitkan hasil penelitiannya yang dimuat dalam beberapa jurnal baik nasional maupun internasional, antara lain: *“Effect of Inoculum Dosage Aspergillus niger and Rhizopus oryzae mixture with Fermentation Time of Oil Seed Cake (Jatropha curcas L) to the content of Protein and Crude Fiber”*, Journal of Physics: Conference Series, 824; Seminar Internasional *“Anti Odor activity of Milk Kefir on Organosulfur Polysulfide cyclic Compounds in Petai (Parkia speciosa hassk)”*, Journal of Physics: Conference Series 1013; narasumber pelatihan *“Pengabdian dan Pelatihan Biologi Terapan di Yayasan Al Aziz Desa Cijambu Kec. Tanjungsari Kab. Sumedang; An effective alternative of pre-dawn meal using milk kefir*, Journal of Physics: Conference Series 1402 (5), 055066 (2019); *Psychochemical and Organoleptic Characteristics of Colostrum Kefir as Antibacterial*, Journal of Physics: Conference Series 1175 (1), 012016 (2019); *Rough Protein Bioconversion and Phorbol Ester Biodegradation on Jatropa curcas L. Seed Cake Fermented with Mold Consortium for Broiler Chiken Feed*, International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 03 (2020).