

Buku Ajar

BIOLOGI SEL

STRUKTUR, FUNGSI, DAN APLIKASINYA DI BIDANG KESEHATAN

Penulis:

Niken Rahmah Ghanny; Hanindita Alifia Putri; Rima Ernia; Retno Widowati;
Suci Indah Astuti; Sri Tati Rukiyani; Rima Agnes Widya Astuti; Dian
Rachma Wijayanti; Larantika Hidayati; Ali Zainal Abidin; Lily Yulia Surya
Sari; Maya Ulfah; Dara Juliana; M. Iman Tarmizi Thaher

BUKU AJAR BIOLOGI SEL: STRUKTUR, FUNGSI, DAN APLIKASINYA DI BIDANG KESEHATAN

Penulis:

**Niken Rahmah Ghanny; Hanindita Alifia Putri;
Rima Ernia; Retno Widowati; Suci Indah Astuti;
Sri Tati Rukiyani; Rima Agnes Widya Astuti;
Dian Rachma Wijayanti; Larantika Hidayati;
Ali Zainal Abidin; Lily Yulia Surya Sari; Maya Ulfah;
Dara Juliana; M. Imam Tarmizi Thaher**

Editor:

Puji Lestari



PT. Mustika Sri Rosadi

BUKU AJAR IOLOGI SEL: STRUKTUR, FUNGSI, DAN APLIKASINYA DI BIDANG KESEHATAN

Penulis:

Niken Rahmah Ghanny; Hanindita Alifia Putri; Rima Ernia; Retno Widowati; Suci Indah Astuti; Sri Tati Rukiyani; Rima Agnes Widya Astuti; Dian Rachma Wijayanti; Larantika Hidayati; Ali Zainal Abidin; Lily Yulia Surya Sari; Maya Ulfah; Dara Juliana; M. Imam Tarmizi Thaher

Editor: Puji Lestari

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

ISBN: 978-634-7535-30-6 (PDF)

Cetakan Pertama: 1 Desember 2025

Hak Cipta 2025

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh Penerbit PT Mustika Sri Rosadi

Alamat Penerbit: Citra Indah City, Bukit Heliconia AG 23/32, Kecamatan Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku "Biologi Sel: Struktur, Fungsi dan Aplikasinya di Bidang Kesehatan" ini dapat disusun dan diselesaikan. Buku ini dirancang sebagai sumber pembelajaran yang komprehensif bagi mahasiswa dalam memahami dasar-dasar biologi sel, mulai dari struktur, fungsi organel, materi genetik, pembelahan sel, hingga penuaan dan kematian sel.

Dengan penyajian yang sistematis, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang praktis dan aplikatif di dunia akademik. Penulis menyadari masih terdapat kekurangan, untuk itu masukan dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung tersusunnya buku ini. Semoga bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan praktik di bidang kesehatan.

Bogor, 1 Desember 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAB 1. PENDAHULUAN BIOLOGI SEL - Niken Rahmah Ghanny	1
A. Sejarah dan Perkembangan Biologi Sel.....	1
B. Pentingnya Biologi Sel dalam Ilmu Kesehatan	4
C. Struktur dan Fungsi Sel	15
D. Teknik Observasi Sel.....	18
E. Latihan Soal.....	21
BAB 2. TEORI DAN JENIS-JENIS SEL - Hanindita Alifia Putri	24
A. Perkembangan Teori Sel Modern	24
B. Tipe Sel Organisme.....	27
C. Diferensiasi Sel.....	34
D. Hubungan Diferensiasi dan Spesialisasi Sel.....	40
E. Latihan Soal.....	40
BAB 3. STRUKTUR DAN FUNGSI MEMBRAN SEL - Rima Ernia	44
A. Pendahuluan.....	44
B. Membran Sel	45
C. Komponen Penyusun Membran Sel	45
D. Struktur Membran Sel.....	47
E. Transportasi Membran	50
F. Latihan Soal.....	56

BAB 4. SITOPLASMA DAN SITOSKELETON - Retno Widowati	60
A. Pendahuluan.....	60
B. Komponen Utama Sitoplasma	62
C. Proses dan Fungsi Esensial Sitoplasma.....	65
D. Sitoskeleton	67
E. Peran Sitoskeleton.....	73
F. Latihan Soal.....	75
BAB 5. ORGANEL-ORGANEL SEL DAN FUNGSINYA - Suci Indah Astuti	80
A. Pendahuluan.....	80
B. Nukleus.....	81
C. Mitokondria	83
D. Ribosom	84
E. Retikulum Endoplasma.....	85
F. Badan Golgi.....	86
G. Lisosom.....	87
H. Peroxisom.....	88
I. Latihan Soal.....	89
BAB 6. INTI SEL DAN MATERI GENETIK - Sri Tati Rukiyani	92
A. Pendahuluan.....	92
B. Struktur Inti Sel.....	93
C. Kromatin, Kromosom dan DNA.....	100
D. Gen dan Ekspresi Gen.....	105
E. Replikasi DNA.....	107
F. Peran Nukleus dalam Aktivitas Seluler	109

G. Nukleus, DNA, dan Kesehatan.....	111
H. Latihan Soal.....	113
BAB 7. SINTESIS DAN TRANSPORT PROTEIN - Rima Agnes Widya Astuti	117
A. Pendahuluan.....	117
B. Transkripsi.....	118
C. Translasi.....	119
D. <i>Folding</i> dan Modifikasi Translasi.....	121
E. Jalur Transport Protein	123
F. Mutasi Genetik dan Dampaknya	128
G. Latihan Soal.....	131
BAB 8. MITOKONDRIA DAN PRODUKSI ENERGI SEL - Dian Rachma Wijayanti	136
A. Mitokondria	136
B. Struktur Mitokondria.....	137
C. Fungsi Mitokondria.....	138
D. Latihan Soal.....	140
BAB 9. KOMUNIKASI SEL - Larantika Hidayati	143
A. Pendahuluan.....	143
B. Konsep Komunikasi Sel	144
C. Jenis Interaksi dan Mode Komunikasi Sel.....	146
D. Reseptor	158
E. Molekul Persinyalan.....	162
F. Transduksi Sinyal	165
G. Latihan Soal.....	168
BAB 10. SIKLUS SEL DAN PEMBELAHAN SEL -Ali Zainal Abidin	173

A. Pendahuluan.....	173
B. Fase-Fase Siklus Sel	174
C. Regulasi Siklus Sel	183
D. <i>Checkpoint</i> dalam Siklus Sel	185
E. Latihan Soal.....	187
BAB 11. MITOSIS DAN MEIOSIS -Lily Yulia Surya Sari	
.....	191
A. Pembelahan Sel.....	191
B. Mitosis.....	192
C. Meiosis.....	197
D. Perbedaan Mitosis dan Meiosis.....	203
E. Signifikansi Biologi dalam Pertumbuhan, Reproduksi, dan Regenerasi.....	208
F. Latihan Soal.....	212
BAB 12. SEL DAN JARINGAN DALAM TUBUH MANUSIA -	
Maya Ulfah	216
A. Integrasi Konsep Sel dalam Pembentukan Jaringan	
.....	216
B. Empat Jaringan Utama pada Tubuh Manusia.....	217
C. Jaringan Epitel.....	219
D. Jaringan Ikat.....	223
E. Jaringan Otot.....	226
F. Jaringan Saraf.....	230
G. Sel Punca (<i>Stem Cells</i>) dalam Regenerasi Jaringan	
.....	235
H. Latihan Soal.....	240

BAB 13. PENUAAN DAN KEMATIAN SEL - Dara Juliana	244
A. Pendahuluan.....	244
B. Mekanismes Penuaan Sel.....	245
C. Dampak Penuan Sel pada Sel dan Jaringan	248
D. Kematian Sel: Apoptosis	251
E. Kematian Sel (Nekroptosis, Piroptosis dan Apoptosis).....	256
F. Integrasi Penuaan dan Kematian Sel dalam Homeostasis dan Penyakit.....	262
G. Latihan Soal.....	263
BAB 14. SEL DALAM SISTEM IMUN DAN PERTAHANAN TUBUH - M Iman Tarmizi Thaher	267
A. Pendahuluan.....	267
B. Jenis-jenis Sel Imun dan Interaksinya dalam Respons Imun.....	268
C. Mekanisme Presentasi Antigen dan Imunitas Seluler Versus Humoral.....	279
D. Latihan Soal.....	285
DAFTAR PUSTAKA	289
BIOGRAFI PENULIS	322
LAMPIRAN	346
SINOPSIS	352

BAB 1. PENDAHULUAN BIOLOGI SEL

A. Sejarah dan Perkembangan Biologi Sel

Biologi sel adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari sel sebagai unit struktural dan fungsional terkecil dari kehidupan. Sejarah dan perkembangan biologi sel sangat erat kaitannya dengan kemajuan mikroskopi dan teori biologi yang terus berkembang. Ketertarikan manusia pada bidang biologi memiliki sejarah yang panjang. Bahkan manusia purba telah mempelajari hewan buruan mereka dan mengetahui dimana menemukan dan mengetahui tumbuhan yang mereka kumpulkan untuk makanan. Penemuan pertanian merupakan kemajuan besar pertama pada peradaban manusia. Selain itu, ilmu kedokteran juga berperan penting dalam sejarah biologi. Naskah medis paling awal yang telah diketahui berasal dari Tiongkok pada tahun 2500 SM, Mesopotamia 2112 SM, dan Mesir 1800 SM.

Pada zaman klasik, Aristoteles sering dianggap sebagai orang pertama yang mempraktikkan zoologi ilmiah. Ia diketahui telah melakukan studi ekstensif tentang kehidupan laut dan tumbuhan. Muridnya, Theophrastus, menulis salah satu naskah botani paling awal yang diketahui di Barat pada 300 SM tentang struktur, siklus hidup, dan kegunaan

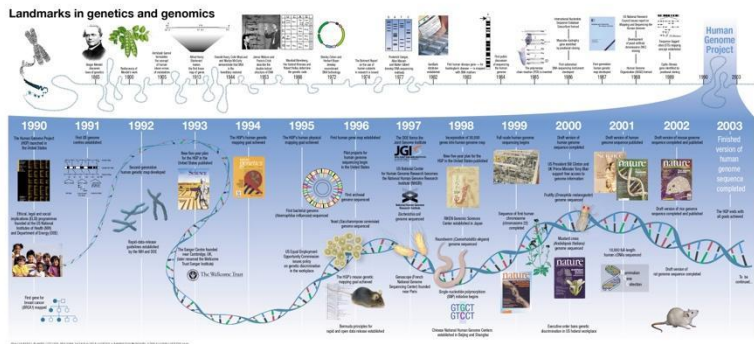
tumbuhan. Leonardo da Vinci menghadapi risiko kecaman karena berpartisipasi dalam pembedahan manusia dan membuat r anatomi detail, indah, dan jauh melampaui standar keilmuan di masa itu (Prem Swaroop Adhikarla et al., 2019).

Pada tahun 1735, penggunaan nama latin untuk mengelompokkan spesies dilakukan berdasarkan karakteristiknya. Robert Hooke mengamati sayatan gabus menggunakan mikroskop sederhana dan memperkenalkan istilah *cellulae*. Ia mengamati bahwa jaringan tumbuhan terdiri dari unit-unit persegi panjang yang mengingatkannya pada ruangan kecil yang digunakan oleh para biarawan, sehingga ia menyebut unit-unit ini sebagai "sel". Pada tahun 1676, Anton Van Leeuwenhoek menerbitkan gambar pertama organisme bersel tunggal yang hidup dan mendokumentasikan kehidupan mikroskopik dengan jelas. Kemudian pada tahun 1859, Charles Darwin menerbitkan "*On the Origin of Species*", sebuah naskah yang telah mengubah dunia dengan menunjukkan bahwa semua makhluk hidup saling terkait dan spesies tidak diciptakan secara terpisah, melainkan muncul dari bentuk-bentuk leluhur yang diubah dan dibentuk oleh adaptasi terhadap lingkungannya (Prem Swaroop Adhikarla et al., 2019).

Gregor Mendel telah dikenal sebagai bapak genetika. Karyanya ditemukan Kembali pada tahun 1900 dan pemahaman tentang genetik sebagai pewaris sifat berkembang lebih jauh. Kemudian James Watson dan Francis Crick yang menjelaskan struktur dan fungsi DNA pada tahun 1953. Saat ini semua bidang biologi telah berkembang pesat dan menyentuh setiap aspek kehidupan kita. Pada abad 20, muncul mikroskop elektron yang memungkinkan visualisasi ultrastruktural sel seperti mitokondria, retikulum endoplasma, lisosom, ribosom, dan organisasi membran sel. Perkembangan biologi molekuler, kultur sel, dan pewarnaan imun seperti imunofluoresen dan imunohistokimia, telah menjadikan biologi sel bergeser menjadi ilmu mekanistik yang menghubungkan struktur dengan fungsi molekulernya (Prem Swaroop Adhikarla et al., 2019).

Pada abad ke 21, biologi sel terintegrasi dengan genomik dan telah terbentuk *human cell atlas* yang merupakan hasil dari *human genome project*. Proyek ini dipimpin oleh sekelompok peneliti internasional yang bertujuan untuk mempelajari secara komprehensif seluruh DNA dari manusia. Awal diluncurkan proyek ini pada oktober 1990 dan selesai pada April 2003. Keberhasilan proyek ini dapat memberikan informasi mendasar tentang cetak biru

manusia dan pemetaan seluruh gen manusia serta perannya dalam kesehatan dan penyakit. Oleh sebab itu, proyek ini memiliki dampak besar terhadap diagnosis dan terapi berbagai penyakit (Green et al., 2015).



Gambar 1.1 *Timeline Human Genome Project*

Berdasarkan sejarahnya, biologi sel berkembang dari observasi sederhana di bawah mikroskop menjadi kerangka konseptual dan teknologis yang menopang kemajuan bidang ilmu kesehatan.

B. Pentingnya Biologi Sel dalam Ilmu Kesehatan

Biologi sel sangat penting untuk memahami ilmu kesehatan karena dapat memberikan informasi mengenai bagaimana sel berfungsi, berkomunikasi, dan merespons rangsangan internal dan eksternal. Hal tersebut mendasari perkembangan, fisiologi, dan proses penyakit. Kemajuan dalam teknologi

multiomik sel tunggal dan spasial juga meningkatkan pengetahuan tentang mekanisme molekuler di tingkat seluler.

Pada ilmu kedokteran, biologi sel berfungsi sebagai “bahasa dasar” untuk memahami fisiologi dan patofisiologi. Beberapa alasan utama pentingnya biologi sel dalam ilmu kesehatan adalah:

1. Dasar Patofisiologi Penyakit

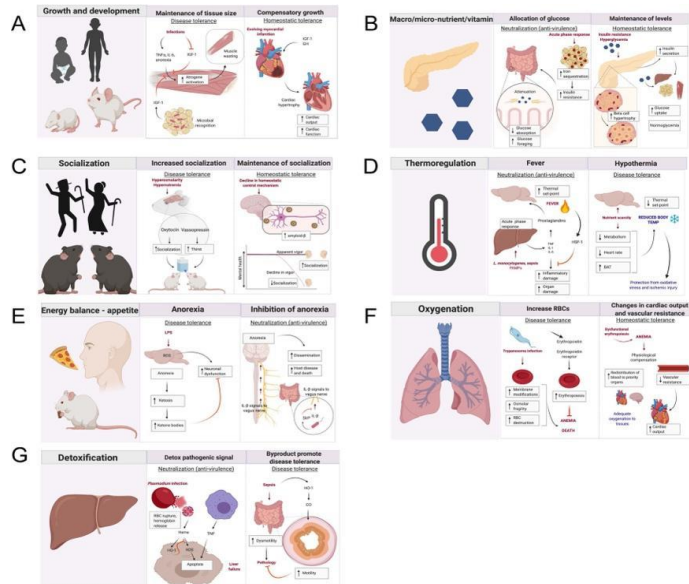
Biologi sel seringkali dijadikan sebagai konsep dasar patofisiologi penyakit. Konsep kesehatan fisiologis menekankan bahwa kesehatan merupakan suatu keadaan biologis aktif yang dipertahankan melalui jaringan mekanisme yang terintegrasi. Selama beberapa dekade, fokus ilmu biologi sel seringkali pada patogenesis dan mekanisme penyakit, sehingga aspek biologis dari kesehatan relatif terabaikan. Padahal, stabilitas fisiologis bergantung pada kemampuan organisme untuk mengatur homeostasis, menjaga integritas jaringan, serta koordinasi dan respons adaptif melalui interaksi sistem metabolik, imunologis, hormonal, dan mikrobiota (Ayres, 2020).

Berbagai tantangan dan gangguan fisiologi, seperti infeksi, cedera, stres metabolik, hingga perubahan lingkungan organisme dapat mengganggu kestabilan tubuh organisme

tersebut. Dalam rangka mempertahankan fungsi hidupnya, organisme akan memanfaatkan tiga strategi fundamental, yaitu: resistensi, toleransi, dan resiliens. Resistensi berfokus pada eliminasi atau penekanan pada agen penyebab gangguan; toleransi ditujukan untuk meminimalkan kerusakan jaringan tanpa harus menghilangkan agen tersebut; sedangkan resiliens merupakan kemampuan untuk pulih dan mengembalikan fungsi setelah terjadi gangguan. Ketiga strategi ini menggambarkan bahwa kondisi tanpa gejala tidak selalu identik dengan kapasitas kesehatan yang kuat; dua individu dapat tampak sama-sama sehat namun memiliki perbedaan signifikan dalam kemampuan toleransi dan pemulihan fisiologis. Pemahaman ini menggeser paradigma dari pendekatan kuratif menuju pendekatan proaktif yang menekankan penguatan mekanisme pemeliharaan kesehatan.

Melalui biologi sel, kita dapat mempelajari mekanisme toleransi penyakit, netralisasi, serta berbagai bentuk toleransi homeostasis merupakan bagian dari variabel fisiologis yang dikendalikan tubuh untuk mempertahankan kesehatan, baik pada kondisi normal maupun dalam situasi lingkungan yang mengancam. Dalam perspektif biologi sel, mekanisme-

mekanisme ini mencerminkan bagaimana sel menggunakan jalur sinyal, respons stres, dan adaptasi metabolik untuk mempertahankan fungsinya.



Gambar1.2 Mekanisme sel dalam menggunakan jalur persinyalan sel, respons stress, dan adaptasi metabolik (Sumber: Ayres, 2020)

Berikut adalah mekanisme keseimbangan sel:

- Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis pertumbuhan dan perkembangan dapat meningkatkan ketahanan selama terjadinya stres fisiologis. Misalnya, mekanisme toleransi

penyakit berevolusi untuk menjaga massa otot rangka selama infeksi, sementara penurunan kontrol homeostasis dapat memicu hipertrofi jantung sebagai upaya mempertahankan fungsi jantung.

- b. Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis glukosa juga berperan penting. Resistensi insulin akut akibat sekuestrasi zat besi pada jaringan adiposa mengalihkan glukosa ke usus untuk mendukung kebutuhan nutrisi mikrobiota, sehingga menekan virulensi patogen dan berfungsi sebagai mekanisme anti-virulensi. Pada kondisi hiperglikemia dan resistensi insulin kronis, respons kompensatori sel β berupa peningkatan sekresi insulin dan pertumbuhan sel (*β -cell Hyperplasia*) meningkatkan pengambilan glukosa untuk dimasukkan ke dalam sel sehingga kadar glukosa tetap berada dalam batas aman.
- c. Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis terkait perilaku sosial turut berkontribusi pada ketahanan selama kondisi lingkungan kurang baik. Pada hewan, peningkatan perilaku sosialisasi selama stres lingkungan, misalnya saat

kekurangan air, makanan, suhu ekstrem, maupun ancaman predator, akan membantu mempertahankan kelangsungan hidup, misalnya dengan meningkatkan peluang mendapatkan air minum dari sumber bersama. Pada manusia, interaksi sosial yang terjaga dapat memperkuat toleransi homeostasis ketika mekanisme kontrol fisiologis melemah, seperti pada kondisi akumulasi β amiloid pada penyakit neurodegeneratif, yaitu salah satu ciri dari penyakit alzheimer.

- d. Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis termoregulasi juga penting dalam menjaga kesehatan selama infeksi. Peningkatan *set-point* termal memicu demam sebagai bagian dari respons imun. Hal ini merupakan mekanisme anti-virulensi yang mengurangi kebutuhan tubuh untuk menghasilkan sinyal proinflamasi berlebih, karena kondisi demam tersebut sudah menekan perkembangan patogen penyebab infeksi. Sebaliknya, dalam kasus hibernasi pada hewan saat kekurangan nutrisi, hewan akan menurunkan *set-point* termal sehingga terjadi hipotermia protektif. Kondisi ini

membantu menghemat energi dan membuat tubuh lebih tahan terhadap kerusakan akibat stres oksidatif maupun iskemia.

- e. Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis keseimbangan energi membantu mempertahankan kesehatan pada fase awal penyakit. Peradangan bakteri dapat menginduksi anoreksia terkait penyakit yang meningkatkan ketosis dan melindungi otak dari stres oksidatif. Beberapa patogen, seperti *Salmonella*, bahkan mengembangkan efektor molekuler (misalnya SlrP) untuk menghambat respons anoreksia melalui manipulasi aksis usus-otak guna mengurangi virulensi.
- f. Mekanisme turunan dari regulasi homeostasis energi membantu mempertahankan kesehatan pada tahap awal penyakit. Pada infeksi bakteri, peradangan dapat memicu anoreksia, sehingga terjadi peningkatan pembentukan keton dari hasil anabolisme lemak, dan hal ini ternyata membantu melindungi otak dari stres oksidatif. Patogen tertentu, seperti *Salmonella*,

bahkan memiliki efektor molekuler (misalnya SlrP) untuk menghambat respons anoreksia melalui manipulasi aksis usus-otak, namun hal ini ternyata justru menurunkan tingkat virulensinya.

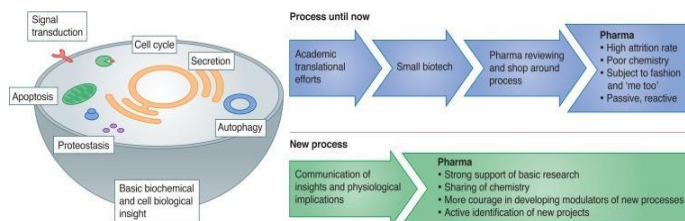
- g. Mekanisme turunan dari kontrol homeostasis oksigenasi berkontribusi pada peningkatan toleransi penyakit. Sebagai contoh, pemberian eritropoietin selama infeksi *Trypanosoma* dapat merangsang pelepasan eritrosit baru ke dalam sirkulasi, sehingga mencegah terjadinya anemia dan meningkatkan toleransi tubuh terhadap penyakit. Ketika eritropoiesis terganggu, tubuh mengaktifkan mekanisme kompensasi, seperti mengalihkan aliran darah ke organ yang lebih vital dan meningkatkan resistensi vaskular untuk mempertahankan ketersediaan oksigen.
- h. Mekanisme turunan dari kontrol homeostatis detoksifikasi juga berfungsi meningkatkan kesehatan selama infeksi. Induksi enzim HO-1 pada malaria membantu pertahanan antivirulensi, sementara salah satu produk detoksifikasinya, karbon monoksida (CO), meningkatkan motilitas usus dan

memperkuat toleransi penyakit selama sepsis.

2. Fondasi Farmakologi dan Terapi Target

Ilmu biologi sel sangat bermanfaat pada pengembangan obat. Sebagian besar obat bekerja pada level seluler, misalnya reseptor membran, kanal ion, enzim sitosolik, atau protein sinyal intraselular. Dari sudut pandang biologi sel, semua proses biologis yang terjadi di dalam sel atau organisme berkontribusi pada homeostasis seluler, sehingga dapat menjadi modulator penyakit. Karena berbagai proses seluler dapat memengaruhi terjadinya penyakit, peneliti menggunakan agen modulasi, baik obat maupun molekul biologis, untuk mempelajari atau menargetkan proses tersebut. Saat ini, mekanisme seperti siklus sel, apoptosis, sekresi, transmisi sinaptik, dan regulasi epigenetik telah menjadi target farmakologis yang umum. Contohnya, biologi membran, *vesicular trafficking*, *protein intrinsically disordered*, segregasi kromosom, dan transdiferensiasi sel yang diperkirakan akan segera menjadi perhatian besar bagi industri kesehatan (Hantschel & Superti-Furga, 2012).

Trend penelitian biologi sel saat ini mengarah pada penelitian pengembangan obat. Penguasaan yang kuat dalam biokimia dan biologi memungkinkan seorang peneliti menafsirkan dan menilai dampak suatu intervensi secara bijaksana. Dengan dasar pengetahuan tersebut, peneliti dapat menentukan apakah sebuah jalur translasi protein layak untuk diteliti lebih lanjut atau tidak. Hal ini pada akhirnya akan menjadi dasar bagi pengujian yang, melalui kemitraan dengan industri farmasi/bioteknologi, dapat mengarah pada penemuan obat baru (Gambar 1.3).



Gambar 1.3 Jalur Pengembangan Obat
(Hantschel & Superti-Furga, 2012)

3. Terapi Sel Punca sebagai Terapi Biologi Sel Modern

Terapi sel punca, rekayasa jaringan, imunoterapi kanker, dan terapi gen semuanya berakar pada pemahaman perilaku sel,

diferensiasi, dan interaksi sel dengan lingkungan mikro-seluler (Hoang et al., 2022; Kaingade et al., 2017). Dalam beberapa tahun terakhir, terapi sel punca telah menjadi topik penelitian ilmiah yang sangat menjanjikan dan maju. Sel punca memiliki potensi besar untuk menjadi salah satu aspek terpenting dalam dunia kedokteran karena perannya yang besar dalam pengembangan metode pengobatan restoratif (Zakrzewski et al., 2019).

Perbedaan antara sel punca dan sel yang telah terdiferensiasi tercermin pada regulasi DNA di dalam selnya. Pada sel punca, struktur kromatin lebih longgar sehingga banyak gen tetap berada dalam keadaan aktif (dapat ditranskripsi). Ketika sinyal diferensiasi diterima, dan proses diferensiasi dimulai, gen-gen yang tidak lagi dibutuhkan akan dimatikan (direpresi), tetapi gen-gen yang dibutuhkan untuk fungsi khusus akan tetap aktif. Menariknya, proses ini bersifat reversibel (dapat balik) karena pluripotensi dapat dipulihkan melalui manipulasi faktor genetik tertentu. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa Oct3/4, Sox2, dan Nanog merupakan faktor transkripsi utama yang mampu mempertahankan keadaan pluripoten bagi sel. Diantara ketiganya, Oct3/4 dan Sox2

memiliki peran krusial dalam proses pembentukan *induced pluripotent stem cells* (iPSC).

Banyak kondisi medis serius, seperti cacat lahir atau kanker, disebabkan oleh diferensiasi atau pembelahan sel yang tidak tepat. Saat ini, terdapat beberapa terapi sel punca yang memungkinkan, diantaranya adalah pengobatan untuk cedera sumsum tulang belakang, gagal jantung, degenerasi retina dan macula, ruptur tendon, dan diabetes melitus tipe 1 (Zakrzewski et al., 2019).

C. Struktur dan Fungsi Sel

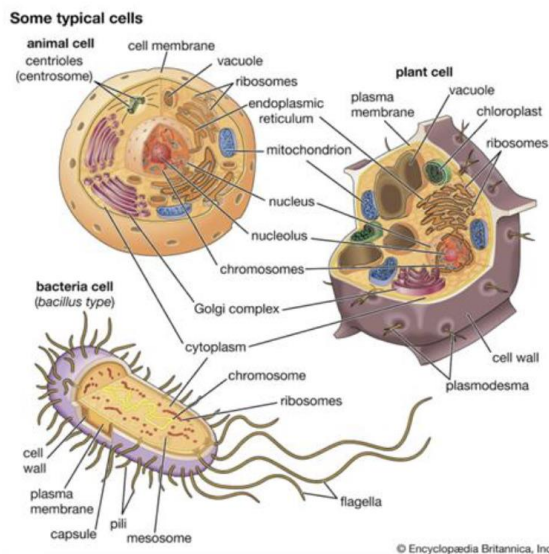
Komponen struktural sel memiliki fungsi yang fundamental. Seperti yang kita semua tahu, semua organisme kecuali virus, termasuk manusia, hewan, tumbuhan, dan bahkan beberapa mikroorganisme, terdiri dari sel. Namun, aktivitas kehidupan virus juga harus bergantung pada sel hidup sebagai inangnya. Secara umum, sebagian besar mikroorganisme misalnya bakteri, terdiri dari sel tunggal, sedangkan hewan dan tumbuhan tingkat tinggi adalah organisme multiseluler. Misalnya manusia yang terdiri dari sekitar 34 triliun sel yang menyusun tubuhnya. Sel sangat kecil sehingga hanya dapat dilihat di bawah mikroskop dan datang dalam

berbagai bentuk dan struktur Sel berukuran sangat kecil sehingga hanya dapat dilihat dengan mikroskop, selain itu sel juga memiliki bentuk dan struktur yang beragam (Hu, 2023).

Sel dapat dibagi menjadi sel hewan, sel tumbuhan, dan bakteri. Sel hewan memiliki berbagai organel sel dengan fungsi khususnya masing-masing. Retikulum endoplasma berperan dalam transportasi bahan di dalam sel serta sintesis protein dan beberapa jenis lipid. Mitokondria menjadi tempat utama respirasi untuk menghasilkan energi untuk aktivitas organisme. Aparatus Golgi memproses dan mengirimkan protein ke tujuan yang tepat. Ribosom berfungsi mensintesis protein berdasarkan informasi genetik dari mRNA hasil transkripsi. Lisosom bertugas menguraikan makromolekul yang tidak lagi dibutuhkan. Membran sel mengatur keluar-masuknya zat sehingga lingkungan internal sel tetap stabil. Sementara itu, nukleus menyimpan DNA yang menentukan banyak sifat secara genetik dan mengendalikan aktivitas sel (Hu, 2023).

Sel hewan memiliki banyak kesamaan dengan sel tumbuhan, seperti keberadaan membran sel, nukleus, dan berbagai organel lain. Namun, sel tumbuhan juga memiliki struktur khusus yang tidak dimiliki sel hewan. Misalnya, dinding sel yang memberikan bentuk dan struktur yang kokoh, serta kloroplas yang

berperan penting dalam proses fotosintesis. Sel tumbuhan juga memiliki vakuola berukuran besar yang berfungsi menyimpan berbagai metabolit dan membantu mengatur kondisi internal sel. Selain itu, terdapat filamen protoplasma yang menjadi jalur penting untuk pertukaran materi dan informasi antar sel. Sementara itu, bakteri memiliki struktur yang berbeda dari keduanya; contohnya, beberapa bakteri memiliki flagela, yaitu struktur tipis menyerupai cambuk yang membantu mereka bergerak (Gambar 1.4).



Gambar 1.4 Komponen Sel (Hu, 2023)

D. Teknik Observasi Sel

Teknik observasi sel merupakan fondasi utama dalam biologi sel karena memungkinkan peneliti memvisualisasikan struktur, dinamika, dan fungsi seluler secara langsung. Mikroskop cahaya menjadi instrumen pertama yang merevolusi pemahaman tentang sel, memanfaatkan cahaya tampak dan sistem lensa untuk menghasilkan pembesaran hingga ratusan kali. Mikroskop cahaya modern, termasuk mikroskop fase kontras, fluoresensi, dan konfokal memungkinkan pengamatan sel hidup, distribusi organel, serta interaksi molekuler secara *real time*. Namun, keterbatasan panjang gelombang cahaya membuat detail ultrastruktural pada skala nanometer tidak dapat terlihat. Untuk itu, mikroskop elektron dikembangkan, menggunakan berkas elektron dengan panjang gelombang jauh lebih pendek sehingga mampu menghasilkan resolusi sangat tinggi. Mikroskop elektron transmisi (TEM) memungkinkan visualisasi struktur internal sel seperti membran, mitokondria, dan kompleks protein, sedangkan mikroskop elektron pemindai (SEM) memberikan gambaran permukaan tiga dimensi dengan detail tinggi. Kombinasi antara mikroskop cahaya dan elektron telah menjadi alat esensial dalam biologi modern, memungkinkan pemetaan struktur subseluler, analisis patologi jaringan, serta

pemahaman mendalam mengenai organisasi dan fungsi sel pada tingkat molekuler.

1. Mikroskop Cahaya

Mikroskop cahaya menggunakan sinar tampak dan sistem lensa untuk memperbesar objek hingga sekitar $1000\times$, dengan resolusi sekitar 200 nm. Thorn (2016) menekankan bahwa mikroskop cahaya sangat ideal untuk mengamati sel hidup karena relatif tidak merusak, dapat dikombinasikan dengan berbagai pewarna dan protein fluoresen, serta dapat memantau dinamika sel secara *real time* (Thorn, 2016). Jenis-jenis utama dari mikroskop cahaya, antara lain:

- a. *Bright field*: untuk preparat berwarna (histologi rutin).
- b. *Phase contrast* dan DIC: meningkatkan kontras sel hidup tanpa pewarnaan.
- c. *Fluorescence* dan *confocal*: memungkinkan visualisasi protein atau organel tertentu dengan penandaan fluoresen, resolusi optik lebih baik, dan pemindaian tiga dimensi.

Mikroskop cahaya merupakan alat utama di laboratorium pendidikan kedokteran dan rumah sakit (histopatologi dan sitologi).

2. Mikroskop Elektron

Mikroskop elektron menggunakan berkas elektron dengan panjang gelombang jauh lebih pendek dibanding cahaya tampak, sehingga mencapai resolusi hingga orde nanometer (Corona et al., 2023). Mikroskop elektron dapat digunakan untuk melihat ultrastruktur membran, mitokondria, ribosom, sitoskeleton, dan organel lain, serta mengkaji detail permukaan sel dan jaringan. Jenis-jenis utama dari mikroskop elektron, antara lain:

- a. *Transmission Electron Microscope* (TEM): menembakkan elektron melalui sayatan ultra-tipis untuk visualisasi struktur internal sel.
- b. *Scanning Electron Microscope* (SEM): memindai permukaan sampel untuk menghasilkan gambaran tiga dimensi.

Pendekatan *correlative light-electron microscopy* (CLEM) menggabungkan keunggulan mikroskop cahaya (dinamika dan penandaan molekuler) dan mikroskop elektron (resolusi ultrastruktur), dan semakin banyak dimanfaatkan dalam riset biomedis modern.

E. Latihan Soal

1. Robert Hooke memperkenalkan istilah "*cellulae*" setelah mengamati struktur mirip ruangan kecil pada gabus. Pengamatan ini dilakukan menggunakan...
 - a. Mikroskop elektron
 - b. Mikroskop sederhana cahaya tampak
 - c. Mikroskop fase kontras
 - d. Mikroskop fluoresensi
2. Anton van Leeuwenhoek dikenal sebagai ilmuwan pertama yang mengamati...
 - a. Struktur DNA
 - b. Organisme bersel tunggal hidup
 - c. Inti sel dan nukleolus
 - d. Organel subseluler seperti mitokondria
3. Perkembangan mikroskop elektron pada abad ke-20 memungkinkan peneliti untuk melihat...
 - a. Pergerakan sel hidup secara *real time*
 - b. Ultrastruktur organel sel seperti mitokondria dan ribosom
 - c. Reaksi kimia di permukaan membran
 - d. Variasi ekspresi gen dalam genom
4. *Human Genome Project* memberikan kontribusi besar pada pengetahuan biologi sel dengan cara...
 - a. Mengidentifikasi seluruh protein manusia
 - b. Memetakan DNA seluruh gen manusia dan perannya dalam kesehatan–penyakit

- c. Menyediakan teknik pewarnaan sel baru
 - d. Menciptakan mikroskop fluoresensi resolusi tinggi
5. Dalam konteks kesehatan fisiologis, strategi toleransi mengacu pada...
 - a. Eliminasi total agen penyebab penyakit
 - b. Pemulihan fungsi tubuh setelah infeksi
 - c. Meminimalkan kerusakan jaringan tanpa menghilangkan agen penyebab
 - d. Peningkatan produksi antibodi spesifik
 6. Manakah berikut ini yang merupakan contoh mekanisme homeostatis dalam biologi sel...
 - a. Kerusakan DNA yang tidak dapat diperbaiki
 - b. Redistribusi aliran darah untuk mengatasi gangguan oksigenasi
 - c. Hipertrofi jantung yang tidak terkait stres fisiologis
 - d. Penghentian seluruh aktivitas metabolik
 7. Pada sel hewan, organel yang berfungsi sebagai tempat respirasi seluler dan menghasilkan energi adalah...
 - a. Ribosom
 - b. Mitokondria
 - c. Lisosom
 - d. Aparatus Golgi
 8. Perbedaan utama antara sel hewan dan sel tumbuhan adalah bahwa sel tumbuhan memiliki...

- a. Ribosom yang lebih besar
 - b. Dinding sel dan kloroplas
 - c. Membran sel dengan lipid khusus
 - d. Mitokondria ganda
9. Mikroskop cahaya lebih unggul dibanding mikroskop elektron untuk studi sel hidup karena...
- a. Memiliki resolusi lebih tinggi
 - b. Tidak merusak sel dan dapat digunakan memantau dinamika secara *real time*
 - c. Dapat melihat detail subseluler hingga skala nanometer
 - d. Menghasilkan gambar 3D permukaan sel
10. *Transmission Electron Microscope* (TEM) digunakan untuk...
- a. Menganalisis gerakan organel dalam sel hidup
 - b. Melihat struktur permukaan tiga dimensi
 - c. Mengamati struktur internal sel melalui sayatan ultra-tipis
 - d. Mengukur aktivitas metabolik intraseluler

BAB 2. TEORI DAN JENIS–JENIS SEL

A. Perkembangan Teori Sel Modern

Teori sel merupakan salah satu pilar utama dalam biologi modern. Semua konsep dasar tentang kehidupan, mulai dari struktur organisme, metabolisme, hingga pewarisan sifat, berakar dari pemahaman mengenai sel. Dalam konteks ilmiah, teori sel tidak hanya menjelaskan bahwa semua makhluk hidup tersusun atas sel, tetapi juga bagaimana sel berfungsi sebagai unit dasar kehidupan yang kompleks dan dinamis. Seiring perkembangan teknologi mikroskop dan biologi molekuler, teori sel mengalami banyak pembaruan hingga muncul konsep yang dikenal sebagai teori sel modern. Teori ini menggabungkan pengetahuan klasik abad ke-19 dengan temuan molekuler abad ke-20 dan ke-21 sehingga menjadikannya lebih komprehensif dalam menjelaskan hakikat kehidupan.

Pemahaman tentang sel pertama kali dimulai pada tahun 1665 ketika Robert Hooke mengamati irisan gabus menggunakan mikroskop sederhana dan memperkenalkan istilah *cellulae* atau "sel" untuk menggambarkan ruang-ruang kecil yang ia lihat. Kemudian, pada tahun 1838, Matthias Schleiden menyatakan bahwa semua tumbuhan tersusun atas sel, dan setahun setelahnya, Theodor Schwann

memperluas konsep tersebut pada hewan (Vasil, 2008). Dari sinilah lahir dua prinsip dasar teori sel, yaitu semua makhluk hidup tersusun atas satu atau lebih sel dan sel adalah unit dasar struktur dan fungsi kehidupan.

Pada tahun 1855, Rudolf Virchow menambahkan prinsip ketiga yang sangat penting yaitu, *omnis cellula e cellula* yang artinya, semua sel berasal dari sel sebelumnya (Ribatti, 2018). Prinsip ini menegaskan bahwa kehidupan hanya dapat muncul dari kehidupan yang sudah ada, bukan dari benda mati seperti yang diyakini sebelumnya dalam teori *generatio spontanea*. Masuknya abad ke-20 menandai perubahan besar dalam pemahaman tentang sel. Mikroskop elektron yang ditemukan pada 1930-an memungkinkan ilmuwan melihat struktur dalam sel secara lebih detail, seperti membran plasma, mitokondria, retikulum endoplasma, dan nukleus (Krukiewicz, 2021). Selain itu, munculnya biologi molekuler dan genetika modern memperluas cakupan teori sel hingga ke tingkat molekul.

Teori sel modern tidak lagi hanya menyoroti struktur dan asal-usul sel, tetapi juga menekankan fungsi molekuler yang ada di dalamnya. Saat ini, teori tersebut mencakup beberapa prinsip utama, antara lain:

1. Sel adalah unit dasar kehidupan. Semua proses biologis seperti metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi, berlangsung di dalam sel.
2. Sel adalah unit genetik. Informasi genetik disimpan dalam DNA yang berada di dalam inti (pada sel eukariota) atau di sitoplasma (pada sel prokariota). DNA diwariskan dari satu sel ke sel berikutnya selama proses pembelahan sel.
3. Sel adalah unit fisiologis. Semua fungsi kehidupan, termasuk pertukaran zat, produksi energi, dan sintesis protein, dikendalikan oleh sistem enzimatik dan mekanisme molekuler di dalam sel.
4. Sel berasal dari sel yang sudah ada. Pembelahan sel seperti mitosis dan meiosis memastikan keberlanjutan kehidupan.
5. Kehidupan muncul dari interaksi antar komponen seluler. Tidak ada bagian tunggal dalam sel yang dapat hidup sendiri; kehidupan merupakan hasil koordinasi dan komunikasi antara organel, molekul, dan sistem biokimia.

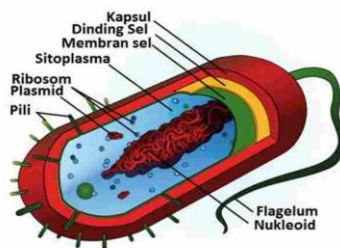
Perkembangan teknologi DNA rekombinan, mikroskop fluoresensi, serta teknik sekuensing genom semakin memperkuat teori sel modern. Melalui pendekatan ini, Ilmuwan dapat memahami bagaimana sel berkomunikasi, bereaksi terhadap

lingkungan, dan mempertahankan kestabilan internalnya (homeostasis) (Wikandari et al, 2021). Misalnya, penelitian dalam bidang bioteknologi menunjukkan bagaimana sel dapat direkayasa untuk menghasilkan protein terapeutik seperti insulin atau antibodi monoklonal. Selain itu, konsep sel punca (*stem cell*) membuka wawasan baru bahwa sel-sel tertentu memiliki kemampuan pluripoten, yaitu dapat berkembang atau berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel tubuh. Hal ini memperkuat prinsip bahwa semua jaringan organisme kompleks berawal dari satu sel tunggal yakni zigot yang mengalami diferensiasi bertahap.

B. Tipe Sel Organisme

Berdasarkan kompleksitas strukturnya, sel dibagi menjadi dua tipe utama yaitu sel prokariotik dan eukariotik.

1. Sel Prokariotik



Gambar 2.1 Sel Prokariotik
(Sumber: Rahmadina et al, 2024)

Sel prokariotik merupakan tipe sel paling sederhana dan tertua secara evolusioner. Istilah “prokariotik” berasal dari bahasa Yunani pro (sebelum) dan karyon (inti), yang berarti “sebelum memiliki inti sejati”. Artinya, sel prokariotik tidak memiliki membran inti. Materi genetiknya berada langsung di sitoplasma dalam daerah yang disebut nukleoid (Rahmadina et al, 2021). Ciri-ciri umum sel prokariotik antara lain:

- a. Tidak memiliki membran inti sejati.
- b. Tidak memiliki organel bermembran seperti mitokondria atau kloroplas.
- c. Ukuran relatif kecil (sekitar 0,1–5 μm).
- d. Struktur internal sederhana namun sangat efisien.
- e. Memiliki dinding sel yang kuat sebagai pelindung.
- f. Berkembang biak dengan cara pembelahan biner, bukan mitosis atau meiosis

Sel prokariotik terutama ditemukan pada dua domain kehidupan: Bacteria dan Archaea. Keduanya memiliki struktur dasar serupa, tetapi berbeda secara biokimia dan genetik. Secara umum, sel prokariotik terdiri dari beberapa komponen utama, yakni :

1) Dinding Sel dan Membran Plasma

Dinding sel memberi bentuk dan perlindungan, tersusun atas peptidoglikan pada bakteri, sedangkan pada Archaea tersusun dari pseudomurein atau protein kompleks (Zhou et al, 2021). Di bawahnya terdapat membran plasma yang mengatur keluar-masuknya zat melalui transport aktif dan pasif.

2) Sitoplasma dan Ribosom

Sitoplasma adalah cairan tempat berbagai reaksi metabolisme terjadi. Di dalamnya terdapat ribosom tipe 70S, yang berfungsi dalam sintesis protein. Meski sederhana, ribosom prokariotik sangat efisien dan menjadi target utama beberapa antibiotik, seperti tetrasiklin dan streptomisin (Londei et al, 2021).

3) Materi Genetik (DNA)

DNA pada sel prokariotik berbentuk sirkular ganda dan tidak dibungkus membran. Selain kromosom utama, banyak bakteri memiliki plasmid, yaitu molekul DNA kecil tambahan yang membawa gen resistensi antibiotik atau kemampuan metabolik khusus.

4) Struktur Permukaan

Beberapa bakteri memiliki flagela (alat gerak), pili (struktur menempel), dan kapsul (lapisan lendir pelindung). Struktur ini

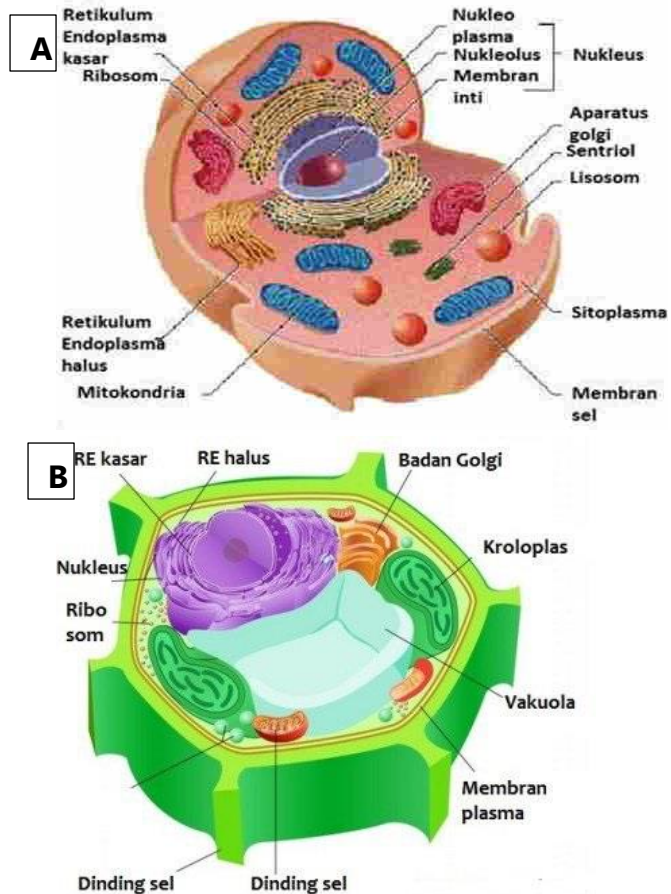
membantu prokariota bertahan hidup di lingkungan ekstrem dan berinteraksi dengan organisme lain (Londei et al, 2021).

2. Sel Eukariotik

Berbeda dengan prokariotik, sel eukariotik memiliki struktur yang jauh lebih kompleks. Kata "eukariotik" berasal dari bahasa Yunani eu (sejati) dan karyon (inti), yang berarti "memiliki inti sejati". Sel eukariotik menyusun organisme dari domain Eukarya, meliputi protista, jamur, tumbuhan, dan hewan (Rahmadina et al, 2024). Ciri-ciri utama sel eukariotik antara lain:

- a. Memiliki membran inti yang membungkus DNA.
- b. Mengandung organel bermembran seperti mitokondria, retikulum endoplasma, dan badan golgi.
- c. Ukuran lebih besar (10–100 μm).
- d. Struktur internal kompleks dengan pembagian fungsi yang jelas.
- e. Reproduksi melalui mitosis atau meiosis.

Kompleksitas ini memungkinkan eukariotik menjalankan berbagai fungsi biologis yang lebih kompleks dibandingkan dengan prokariotik, termasuk diferensiasi sel dan pembentukan jaringan.



Gambar 2.2 (A) Struktur sel hewan; dan (B) sel tumbuhan (Rahmadina et al, 2024).

Sel eukariotik memiliki berbagai organel yang masing-masing memiliki fungsi spesifik, antara lain:

- 1) Inti Sel (Nukleus)