



**MODUL MATA KULIAH BIOLOGI SEL  
(NCA 103)**

Topik :

**RESPIRASI SEL DAN METABOLISME SEL**

DISUSUN OLEH :

Dr. TITTA NOVIANTI, S.Si., M.Biomed.

**UNIVERSITAS ESA UNGGUL**

Universitas  
**Esa Unggul**  
2020

## RESPIRASI SEL DAN METABOLISME SEL

### A. Kemampuan Akhir Yang Diharapkan

Setelah mempelajari modul ini, diharapkan mahasiswa mampu :

1. Menjelaskan tentang pengertian respirasi sel dan metabolisme sel
2. Peranan respirasi sel dan metabolisme sel bagi kelangsungan hidup sel

### B. Uraian

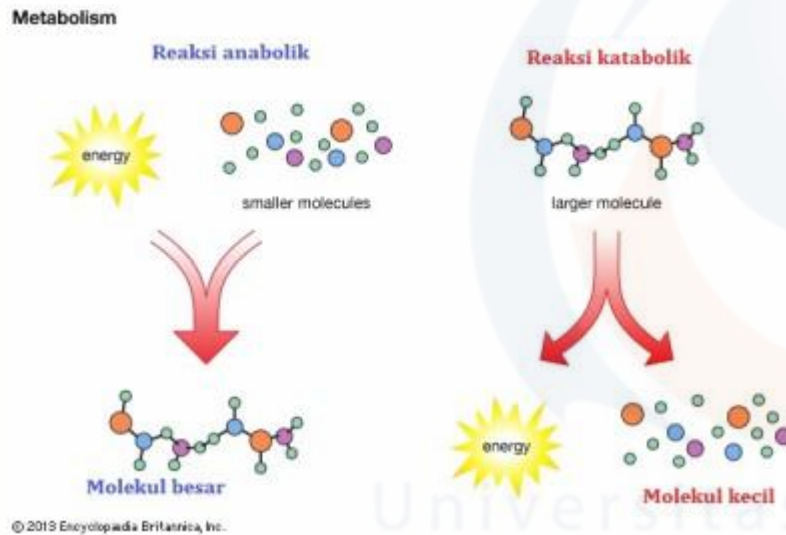
#### 1. Pendahuluan

Metabolisme Keseluruhan reaksi kimia yang membuat makhluk hidup mampu melakukan aktivitasnya disebut metabolisme, dan sebagian besar reaksi kimia tersebut terjadi di dalam sel. Metabolisme yang terjadi di dalam sel dapat berupa reaksi katabolik, yaitu perombakan senyawa kimia untuk menghasilkan energi maupun untuk dijadikan bahan pembentukan senyawa lain, dan reaksi anabolik, yaitu reaksi penyusunan komponen sel. Salah satu proses katabolik yang merombak molekul makanan untuk menghasilkan energi di dalam sel ialah respirasi seluler, yang sebagian besar berlangsung di dalam mitokondria eukariota atau sitosol prokariota dan menghasilkan ATP. Sementara itu, contoh proses anabolik ialah sintesis protein yang berlangsung pada ribosom dan membutuhkan ATP.

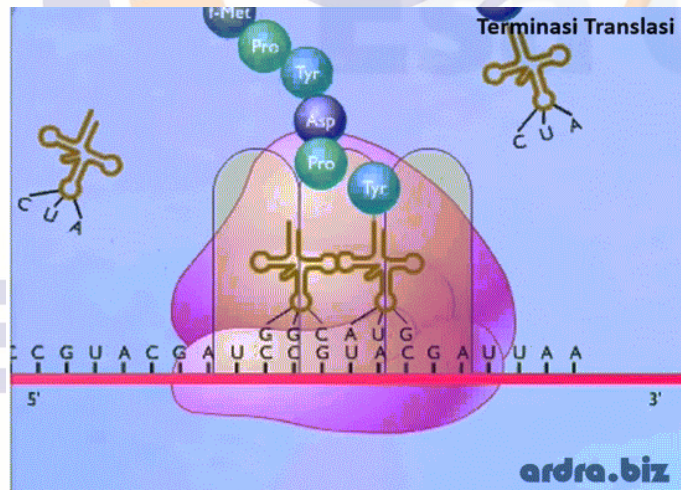
Metabolisme adalah reaksi atau perubahan kimia yang terjadi pada senyawa-senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup. Berbagai senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup seperti karbohidrat secara dinamis sebagai sumber energi akan dipecah untuk menghasilkan energi, sebaliknya berbagai senyawa bermolekul kecil akan dirangkaikan dalam jalur biosintesis untuk menghasilkan berbagai jenis molekul yang diperlukan tubuh. Metabolisme adalah reaksi atau perubahan kimiawi yang terjadi pada senyawa-senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup.

Lintasan metabolisme dapat digolongkan menjadi 3 kategori:

1. Lintasan anabolik (penyatuan/pembentukan) Ini merupakan lintasan yang digunakan pada sintesis senyawa pembentuk struktur dan mesin tubuh. Salah satu contoh dari kategori ini adalah sintesis protein.
2. Lintasan katabolik (pemecahan) Lintasan ini meliputi berbagai proses oksidasi yang melepaskan energi bebas, biasanya dalam bentuk fosfat energi tinggi atau unsur ekuivalen pereduksi, seperti rantai respirasi dan fosforilasi oksidatif
3. Lintasan amfibolik (persimpangan) Lintasan ini memiliki lebih dari satu fungsi dan terdapat pada persimpangan metabolisme sehingga bekerja sebagai penghubung antara lintasan anabolik dan lintasan katabolik.



Gambar 1. Perbedaan reaksi anabolisme dan katabolisme



Gambar 2. Reaksi anabolisme: sintesis protein

## 2. Proses katabolisme

Karbohidrat adalah salah satu biomolekul sumber energi yang utama. Karbohidrat diserap dari saluran pencernaan dalam bentuk monosakarida, terutama sebagai glukosa, fruktosa, dan galaktosa. Senyawa-senyawa monosakarida tersebut sebagian akan langsung digunakan oleh sel sebagai sumber energi, diproses dalam glikolisis menjadi piruvat, lalu diubah menjadi asetil co-A melalui reaksi dekarboksilasi oksidatif dan dioksidasi sempurna dalam siklus Krebs menjadi CO<sub>2</sub> dan menghasilkan banyak energi.

Sebagian senyawa-senyawa monosakarida akan dibawa ke hati dan diubah menjadi glikogen dalam satu jalur biokimia yang disebut glikogenesis. Glikogen yang terbentuk segera dihidrolisis kembali menjadi glukosa untuk menstabilkan kadar glukosa darah dan menyediakan bahan sumber energi bagi sel tubuh. Proses hidrolisis glikogen

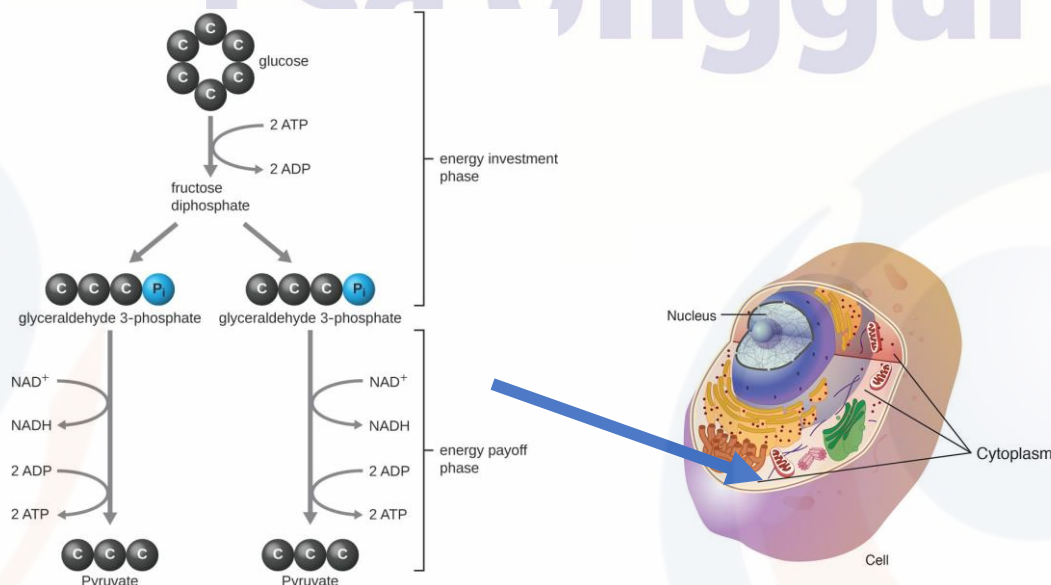
menjadi glukosa disebut glikogenolisis. Glukosa yang terbentuk lalu diangkut ke seluruh sel-sel tubuh dan dikatabolisme untuk menghasilkan energi.

Proses oksidasi glukosa menjadi CO<sub>2</sub> hanya dapat berlangsung dalam keadaan aerob. Keadaan anaerob, asam piruvat diubah menjadi asam laktat, dan dapat diubah kembali menjadi asam piruvat apabila keadaan menjadi aerob kembali. Asam piruvat merupakan substrat untuk berbagai jalur metabolisme. Selain diubah menjadi asetil Ko-A, sebagian asam piruvat juga dapat diubah menjadi glukosa dalam jalur glikoneogenesis yaitu jalur pembentukan glukosa dari bahan-bahan bukan karbohidrat.

Peristiwa yang dialami unsur-unsur makanan setelah dicerna dan diserap adalah metabolisme intermediet. Jadi, metabolisme intermediet mencakup suatu bidang luas yang berupaya memahami bukan saja lintasan metabolik yang dialami oleh masing-masing molekul, tetapi juga interelasi dan mekanisme yang mengatur arus metabolit melewati lintasan tersebut.

### 1. GLIKOLISIS

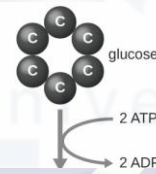
Glikolisis berlangsung di dalam sitosol semua sel. Lintasan katabolisme ini adalah proses pemecahan glukosa menjadi asam piruvat, pada suasana aerob (tersedia oksigen) dan menjadi asam laktat, pada suasana anaerob (tidak tersedia oksigen). Glikolisis merupakan jalur utama metabolisme glukosa agar terbentuk asam piruvat, dan selanjutnya asetil-KoA untuk dioksidasi dalam siklus asam sitrat (Siklus Krebs's). Selain itu glikolisis juga menjadi lintasan utama metabolisme fruktosa dan galaktosa.



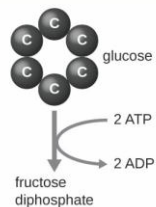
Gambar 3. Glikolisis terjadi di sitoplasma

Keseluruhan persamaan reaksi untuk glikolisis yang menghasilkan laktat adalah:

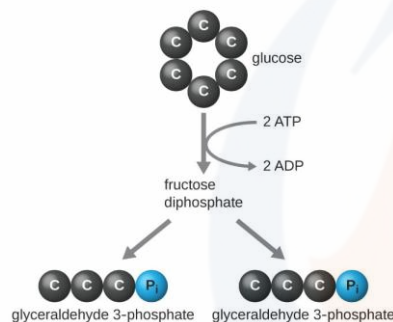
1. Glukosa masuk lintasan glikolisis melalui fosforilasi menjadi glukosa-6 fosfat dengan dikatalisir oleh enzim heksokinase atau glukokinase dari sel parenkim hati dan sel Pulau Langerhans pancreas. Proses ini memerlukan ATP sebagai donor fosfat. ATP bereaksi sebagai kompleks Mg-ATP, sehingga menjadi ADP. Reaksi ini disertai kehilangan energi bebas dalam jumlah besar berupa kalor, sehingga dalam kondisi fisiologis dianggap irrevesibel.



2. Glukosa 6-fosfat diubah menjadi Fruktosa 6-fosfat dengan bantuan enzim fosfoheksosa isomerase dalam suatu reaksi isomerasi aldosa-ketosa. Fruktosa 6-fosfat diubah menjadi Fruktosa 1,6-bifosfat dengan bantuan enzim fosfofruktokinase.



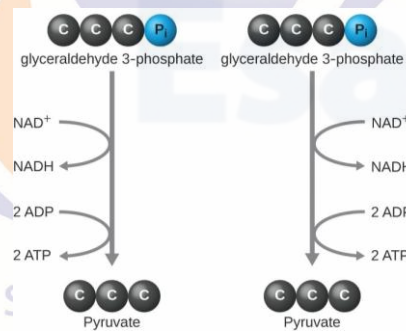
3. Fruktosa 1,6-bifosfat dipecah menjadi 2 senyawa triosa fosfat yaitu gliserahdehid 3- fosfat dan dihidroksi aseton fosfat. Reaksi ini dikatalisir oleh enzim aldolase (fruktosa 1,6-bifosfat aldolase).



4. Gliseraldehid 3-fosfat dapat berubah menjadi dihidroksi aseton fosfat dan sebaliknya (reaksi interkonversi).
5. Glikolisis berlangsung melalui oksidasi Gliseraldehid 3-fosfat menjadi 1,3-bifosfogliserat, dan karena aktivitas enzim fosfotriosa isomerase, senyawa

dihidroksi aseton fosfat juga dioksidasi menjadi 1,3-bifosfogliserat melewati gliseraldehid 3- fosfat. Enzim yang bertanggung jawab terhadap oksidasi di atas adalah gliseraldehid 3-fosfat dehidrogenase, suatu enzim yang bergantung kepada NAD. Atom-atom hidrogen yang dikeluarkan dari proses oksidasi ini dipindahkan kepada NAD<sup>+</sup> yang terikat pada enzim. Pada rantai respirasi mitokondria akan dihasilkan tiga fosfat berenergi tinggi (+3P).

Catatan: Karena fruktosa 1,6-bifosfat yang memiliki 6 atom C dipecah menjadi Gliseraldehid 3- fosfat dan dihidroksi aseton fosfat yang masing-masing memiliki 3 atom C, dengan demikian terbentuk 2 molekul gula yang masing-masing beratom C tiga (triosa).



7. Energi yang dihasilkan dalam proses oksidasi disimpan melalui pembentukan ikatan sulfur berenergi tinggi, setelah fosforolisis, sebuah gugus fosfat berenergi tinggi dalam posisi 1 senyawa 1,3 bifosfogliserat. Fosfat berenergi tinggi ini ditangkap menjadi ATP dalam reaksi lebih lanjut dengan ADP, yang dikatalisir oleh enzim fosfogliserat kinase.

8. 3-fosfogliserat diubah menjadi 2-fosfogliserat dengan dikatalisir oleh enzim fosfogliserat mutase. Senyawa 2,3-bifosfogliserat (difosfogliserat, DPG) merupakan intermediate dalam reaksi ini. 2-fosfogliserat diubah menjadi fosfoenol piruvat (PEP) dengan bantuan enzim enolase. Reaksi ini melibatkan dehidrasi serta pendistribusian kembali energi di dalam molekul, menaikkan valensi fosfat dari posisi 2 ke status berenergi tinggi.

10. Fosfat berenergi tinggi PEP dipindahkan pada ADP oleh enzim piruvat kinase sehingga menghasilkan ATP. Enol piruvat yang terbentuk dalam reaksi ini mengalami konversi spontan menjadi keto piruvat. Reaksi ini disertai kehilangan energi bebas dalam jumlah besar sebagai panas dan secara fisiologis adalah irreversible. Fosfoenol piruvat + ATP

11. Jika keadaan bersifat anaerob (tak tersedia oksigen), reoksidasi NADH melalui pemindahan sejumlah unsur ekuivalen pereduksi akan dicegah. Piruvat akan direduksi oleh NADH menjadi laktat. Dalam keadaan aerob, piruvat diambil oleh mitokondria, dan setelah konversi menjadi asetil-KoA, akan dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> melalui siklus asam sitrat (Siklus Krebs's). Ekuivalen pereduksi dari reaksi NADH + H<sup>+</sup> yang terbentuk

dalam glikolisis akan diambil oleh mitokondria untuk oksidasi melalui salah satu dari reaksi ulang alik (shuttle).

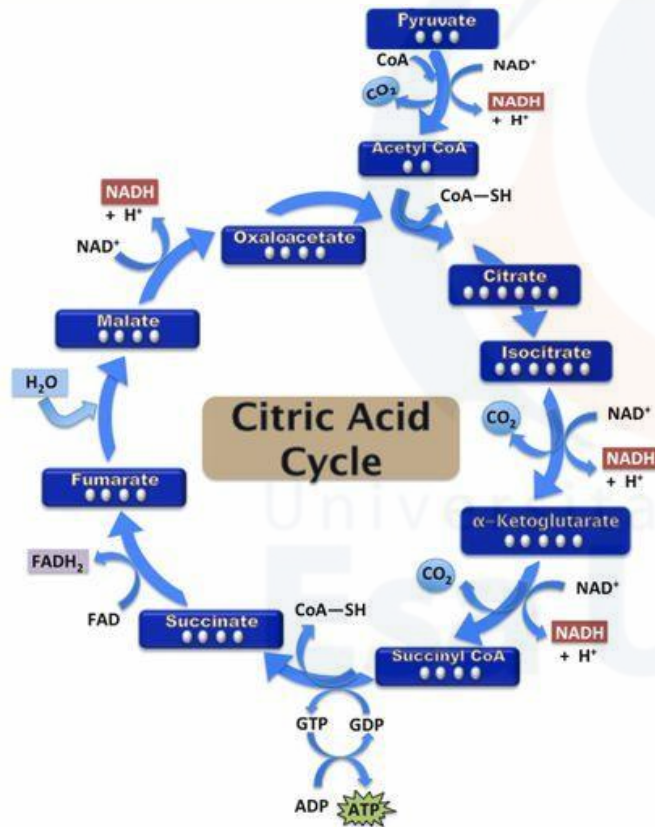
## 2. SIKLUS KREBS

Siklus diawali dengan reaksi antara gugus asetil KoA dan asam karboksilat empat karbon oksaloasetat yang membentuk asam trikarboksilat enam-karbon, yaitu sitrat. Pada reaksi-reaksi berikutnya, terjadi pembebasan dua molekul CO<sub>2</sub> dan pembentukan ulang oksaloasetat. Hanya sejumlah kecil oksaloasetat yang dibutuhkan untuk mengoksidasi asetil-KoA dalam jumlah besar; senyawa ini dapat dianggap memiliki peran katalitik.

Secara berurutan, glukosa, asam lemak serta gliserol dan asam amino dalam pencernaan diproses melalui lintasan metaboliknya masing-masing menjadi suatu produk umum yaitu Asetil KoA, yang kemudian akan dioksidasi secara sempurna melalui siklus asam sitrat.

Terdapat beberapa jalur metabolisme karbohidrat, baik yang tergolong sebagai katabolisme maupun anabolisme, yaitu glikolisis, oksidasi piruvat, siklus asam sitrat, glikogenesis, glikogenolisis serta glukoneogenesis. Secara ringkas, jalur-jalur metabolisme karbohidrat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Glukosa sebagai bahan bakar utama akan mengalami glikolisis (dipecah) menjadi 2 piruvat jika tersedia oksigen. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- b. Selanjutnya masing-masing piruvat dioksidasi menjadi asetil KoA. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- c. Asetil KoA akan masuk ke jalur persimpangan yaitu siklus asam sitrat. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- d. Jika sumber glukosa berlebihan, melebihi kebutuhan energi kita maka glukosa tidak dipecah, melainkan akan dirangkai menjadi polimer glukosa (disebut glikogen). Glikogen ini disimpan di hati dan otot sebagai cadangan energi jangka pendek. Jika kapasitas penyimpanan glikogen sudah penuh maka karbohidrat harus dikonversi menjadi jaringan lipid sebagai cadangan energi jangka panjang.
- e. Jika terjadi kekurangan glukosa dari diet sebagai sumber energi, maka glikogen dipecah menjadi glukosa. Selanjutnya, glukosa mengalami glikolisis, diikuti dengan oksidasi piruvat sampai dengan siklus asam sitrat. f. Jika glukosa dari diet tak tersedia dan cadangan glikogenpun juga habis, maka sumber energi non karbohidrat yaitu lipid dan protein harus digunakan. Jalur ini dinamakan glukoneogenesis (pembentukan glukosa baru) karena dianggap lipid dan protein harus diubah menjadi glukosa baru yang selanjutnya mengalami katabolisme untuk memperoleh energi.



Gambar 4. Siklus Krebs

### 3. TRANSFER ELEKTRON

Transpor elektron adalah proses terakhir dari respirasi aerob, dimana akan dihasilkan ATP dari NADH dan FADH<sub>2</sub> hasil dari glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, dan siklus krebs. Transpor elektron terjadi di membran dalam mitokondria, di membran ini terdapat bagian-bagian penting yang berperan sebagai penerima elektron yaitu kompleks protein I, kompleks protein II, kompleks protein III, kompleks protein IV, ubiquinon, dan sitokrom c. Proses ini disebut juga dengan fosforilasi oksidatif dan ditemukan pada tahun 1948 oleh Eugene Kennedy dan Albert Lehninger. Secara singkat transpor elektron untuk NADH sebagai berikut :

- Molekul NADH akan melepaskan elektronnya dan ditangkap kompleks protein I kemudian berpindah menuju ubiquinon.
- Saat elektron meninggalkan kompleks protein I, menyebabkan sebuah H<sup>+</sup> dikeluarkan menuju ruang antar membran.
- Dari ubiquinon, elektron akan menuju kompleks protein III dan kemudian menuju sitokrom c.
- Saat elektron meninggalkan kompleks protein III, sebuah H<sup>+</sup> juga akan dikeluarkan menuju ruang antar membran.

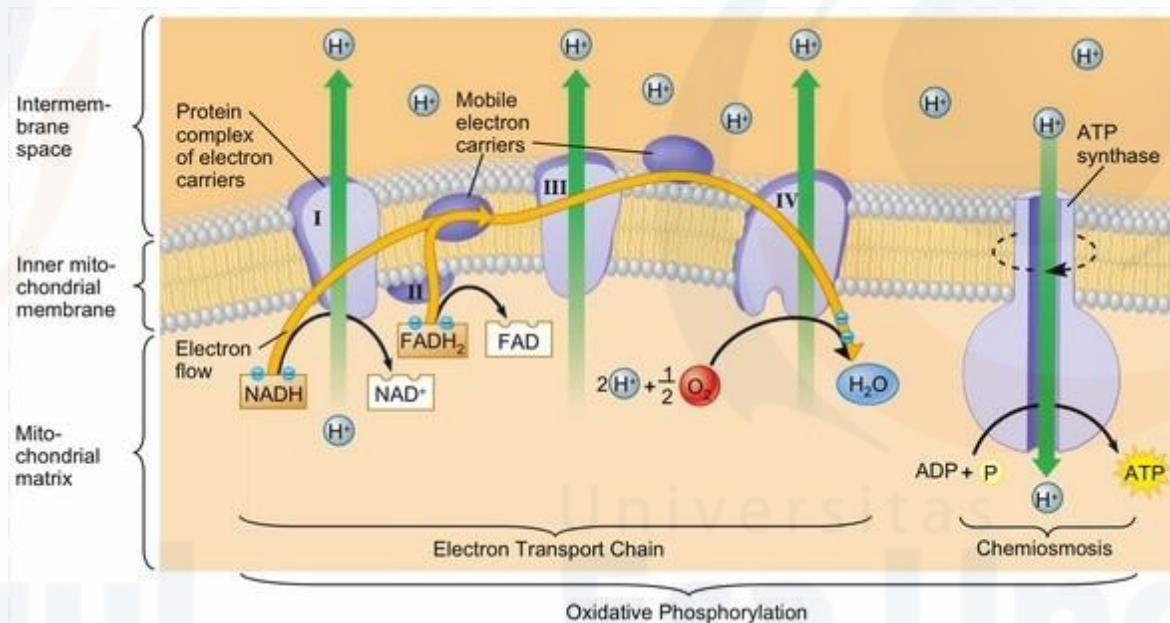


- Dari sitokrom c elektron akan menuju kompleks sitokrom IV yang kemudian akan menuju penerima elektron terakhir yaitu O<sub>2</sub>.
- Saat elektron meninggalkan kompleks protein IV menyebabkan sebuah H<sup>+</sup> juga dikeluarkan menuju ruang antar membran.
- O<sub>2</sub> setelah menerima elektron akan mengikat H<sup>+</sup> dan membentuk H<sub>2</sub>O
- Tiga H<sup>+</sup> yang telah dikeluarkan tadi akan masuk kembali melalui enzim ATP sintase yang berada di membran tersebut.
- Setiap H<sup>+</sup> yang masuk melalui ATP sintase juga akan dihasilkan 1 molekul ATP.
- Jadi total dari satu NADH akan dihasilkan 3 ATP.

Dan proses transpor elektron untuk molekul FADH<sub>2</sub> sebagai berikut :

- Molekul FADH<sub>2</sub> akan melepaskan elektronnya dan ditangkap kompleks protein II kemudian berpindah menuju ubiquinon, namun pada tahap ini tidak menyebabkan dikeluarkannya H<sup>+</sup>.
- Kemudian elektron akan meninggalkan ubiquinon dan menuju kompleks protein III, sitokrom C, dan kompleks protein IV.
- Saat elektron melewati kompleks protein III dan IV masing-masing menyebabkan dikeluarkannya molekul H<sup>+</sup>.
- Jadi hanya 2 H<sup>+</sup> yang dikeluarkan hingga nantinya masuk kembali melalui ATP sintase dan terbentuk 2 ATP.
- Di akhir cerita elektron juga akan ditangkap oleh O<sub>2</sub> menghasilkan H<sub>2</sub>O.

Dari kedua proses diatas NADH menghasilkan 3 molekul ATP sedangkan FADH<sub>2</sub> menghasilkan 2 molekul ATP. Jadi, dalam transpor elektron dihasilkan kira-kira 34 ATP. Ditambah dari hasil glikolisis dan siklus Krebs, maka secara keseluruhan reaksi respirasi seluler menghasilkan total 38 ATP dari satu molekul glukosa. Akan tetapi, karena dibutuhkan 2 ATP untuk melakukan transpor aktif, maka hasil bersih dari setiap respirasi seluler adalah 36 ATP.



Gambar 5. Transfer elektron pada inner membrane mitokondria

#### 4. GLIKOGENESIS

Glikogenesis adalah proses pembentukan atau biosintesis glikogen yang terjadi terutama di dalam hati dan otot. Glikogen atau gula otot merupakan cadangan makanan yang dibentuk dari molekul glukosa hasil pencernaan makanan. Glukosa akan saling berikatan dengan ikatan  $\alpha$  1-4 glikosidik untuk membentuk glikogen. Molekul glikogen tersusun bercabang-cabang agar dapat tersimpan maksimal di dalam sel. Kelebihan kadar glukosa di dalam darah akan memicu disekresikannya hormon insulin untuk memicu terjadinya glikogenesis.

Glikogen ini dapat dipecah lagi menjadi glukosa saat kadar glukosa darah menurun seperti dalam keadaan lapar atau puasa. Glikogenesis terjadi dengan cara penambahan molekul glukosa pada rantai glikogen yang telah ada (disebut sebagai glikogen primer). Penambahan glukosa akan terjadi secara bertahap, satu demi satu molekul glukosa akan memperpanjang glikogen yang telah ada.

Sintesis glikogen melalui glikogenesis Proses glikogenesis di dalam tubuh adalah sebagai berikut.

- Fosforilasi glukosa oleh ATP menjadi glukosa 6-fosfat, dikatalisis oleh enzim glukokinase/hexokinase.
- Berikutnya glukosa 6-fosfat mengalami reaksi isomerasi menjadi glukosa 1-fosfat, dikatalisis oleh enzim fosfoglukomutase
- Glukosa 1-fosfat bereaksi dengan uridin tri phosphate (UDP) menjadi uridil di phosphate glukosa (UDP-glukosa), dikatalisis oleh enzim glukosa 1-fosfat uridil transferase.

- UDP-glukosa kemudian akan diikatkan pada rantai glikogen yang sudah ada, dikatalisis oleh enzim glikogen sintase. Dalam proses ini, atom C pertama dari UDP-glukosa diikatkan ke atom C keempat yang ada pada rantai glikogen primer dan membentuk ikatan  $\alpha$  1-4 glikosidik.
- Berikutnya enzim pembentuk cabang (branching enzyme) akan memindahkan kurang lebih 6 residu glukosa pada salah satu residu glukosa yang ada pada glikogen primer untuk membentuk titik cabang. Enam residu glukosa tersebut akan diikatkan pada atom C nomor 6 pada molekul glikogen primer.
- Penambahan glukosa terus berlangsung pada kedua cabang hingga semakin panjang dan akan terbentuk banyak cabang-cabang baru di berbagai lokasi.
- Glikogenesis akan berakhir apabila gula dalam darah telah mencapai kadar yang normal.

Proses pembentukan glikogen melalui glikogenesis merupakan langkah penting dalam menjaga kadar gula dalam darah tetap normal. Ketidakmampuan tubuh untuk menjalankan glikogenesis dengan wajar dapat mengakibatkan timbulnya penyakit diabetes melitus. Diabetes melitus dapat menjadi penyakit yang berbahaya dan mematikan karena memicu berbagai komplikasi seperti stroke, kerusakan jaringan, dan kebutaan. Mekanisme reaksi glikogenesis juga merupakan jalur metabolisme umum pada biosintesis disakarida dan polisakarida.

Dalam proses tersebut UDP-glukosa bereaksi dengan fruktosa 6-fosfat dikatalisis oleh enzim sukrosa fosfat sintase, membentuk sukrosa 6-fosfat. Kemudian enzim sukrosa fosfatase akan mengkatalisis sukrosa 6-fosfat menjadi sukrosa.

Tahap pertama penguraian glikogen adalah pembentukan glukosa 1-fosfat. Berbeda dengan reaksi pembentukan glikogen, reaksi ini tidak melibatkan UDP-glukosa, dan enzimnya adalah glikogen fosforilase. Selanjutnya glukosa 1-fosfat diubah menjadi glukosa 6-fosfat oleh enzim yang sama seperti pada reaksi kebalikannya (glikogenesis) yaitu fosfoglukomutase.

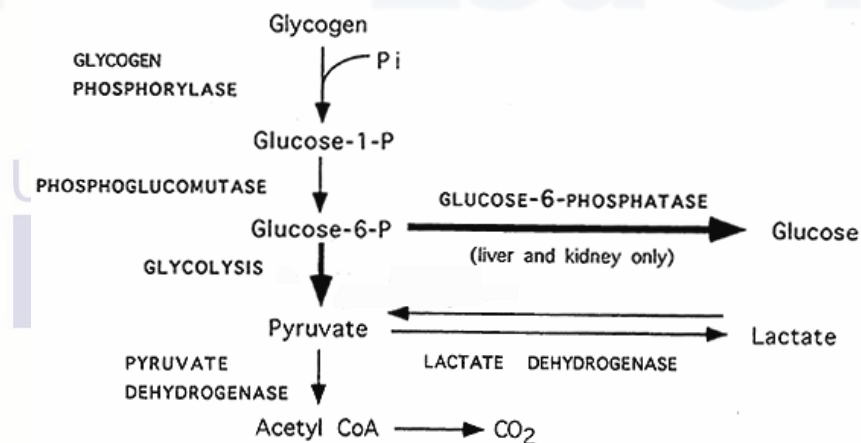
Proses glikogenolisis yang terjadi di dalam sel adalah sebagai berikut.

1. Enzim glikogen fosforilase akan menambahkan fosfat anorganik dan membebaskan glukosa dalam bentuk glukosa 1-fosfat. Pemecahan ini akan terus berlangsung hingga tersisa kurang lebih 4 residu glukosa dari titik cabang.
2. Enzim transferase akan memindahkan 3 residu glukosa menuju ujung cabang yang lain, proses ini akan menyisakan satu residu glukosa pada titik cabang yang terikat dengan ikatan  $\alpha$  1-6 glikosidik.

3. Debranching enzyme atau enzim pemecah cabang ( $\alpha$  1-6 glukosidase) akan membebaskan glukosa pada titik cabang dan melepaskannya dalam bentuk glukosa (bukan glukosa 1-fosfat seperti pada reaksi pertama).
4. Proses glikogenolisis berakhir pada tahapan diatas, namun hasil pemecahan glikogen yang berupa glukosa 1-fosfat akan mengalami proses lebih lanjut agar dapat berubah menjadi glukosa.

Tahap reaksi berikutnya adalah pembentukan glukosa dari glukosa 6-fosfat. Berbeda dengan reaksi kebalikannya dengan glukokinase, dalam reaksi ini enzim lain, glukosa 6- fosfatase, melepaskan gugus fosfat sehingga terbentuk glukosa. Reaksi ini tidak menghasilkan ATP dari ADP dan fosfat.

Glukosa yang terbentuk inilah nantinya akan digunakan oleh sel untuk respirasi sehingga menghasilkan energi, energi itu terekam / tersimpan dalam bentuk ATP



Gambar 6. Siklus Glikogenesis

## 5. GLUKONEOGENESIS

Glukoneogenesis merupakan proses pembentukan glukosa dari senyawa bukan glukosa. Glukoneogenesis memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan akan glukosa, terutama ketika tubuh tidak mendapat pasokan glukosa yang cukup dari makanan. Glukosa merupakan molekul yang sangat penting terutama bagi eritrosit (sel darah merah) dan sel saraf otak, karena sel-sel tersebut tidak dapat menggunakan molekul lain sebagai sumber energi (walaupun dalam keadaan kelaparan yang sangat panjang sel saraf otak mampu menggunakan benda keton yaitu beta hidroksibutirat sebagai sumber energi).

Selain memenuhi kebutuhan energi bagi otak dan eritrosit, glukosa juga merupakan satu-satunya molekul penghasil energi bagi otot dalam keadaan anaerobic (tanpa oksigen). Glukosa juga diperlukan bagi pembentukan laktosa (gula susu) di kelenjar susu untuk memenuhi kebutuhan energi bayi.

Pada mamalia, hati dan ginjal merupakan organ utama untuk berlangsungnya glukoneogenesis. Secara umum tahapan reaksi glukoneogenesis hampir sama dengan tahapan reaksi glikolisis yang dibalik arahnya. Namun ada beberapa tahapan dalam glukoneogenesis yang tidak sama dengan glikolisis dan memerlukan kerja enzim-enzim yang berbeda. Perbedaan ini terjadi karena pada tahapan-tahapan tersebut enzim yang terlibat tidak dapat bekerja secara bolak-balik. Glikolisis merupakan reaksi yang menghasilkan energi, sedangkan glukoneogenesis merupakan proses yang membutuhkan energi dalam bentuk ATP

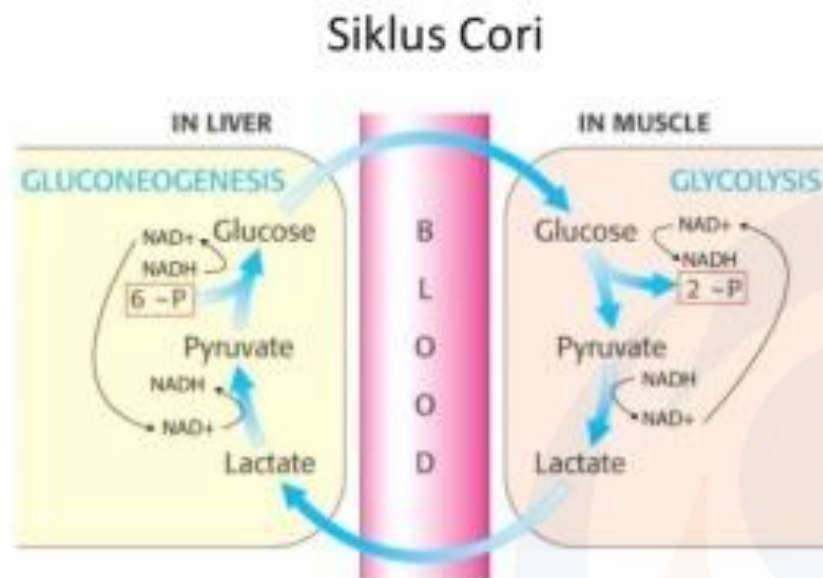
Proses glukoneogenesis yang terjadi pada hati dan ginjal adalah sebagai berikut.

- Pengubahan piruvat menjadi oksaloasetat, dikatalisis oleh enzim piruvat karboksilase.
- (Oksaloasetat pada reaksi di atas terdapat pada mitokondria dan harus dikeluarkan menuju sitoplasma, namun molekul tersebut tidak dapat melewati membran mitokondria sebelum diubah menjadi malat. Jadi oksaloasetat akan diubah menjadi malat agar dapat keluar menuju sitoplasma dan akan segera diubah kembali menjadi oksaloasetat).
- Pengubahan oksaloasetat menjadi malat, dikatalisis oleh enzim malat dehidrogenase. Malat keluar dari mitokondria menuju sitoplasma.
- Di sitoplasma, malat diubah menjadi oksaloasetat kembali yang dikatalisis oleh enzim malat dehidrogenase.
- Oksaloasetat kemudian akan diubah menjadi fosfoenol piruvat, dikatalisis oleh enzim fosfoenolpiruvat karboksilase.
- Fosfoenol piruvat akan diubah menjadi 2-fosfoglisarat, dikatalisis oleh enzim enolase.
- 2-fosfoglisarat akan diubah menjadi 3-fosfoglisarat yang dikatalisis enzim fosfoglisaromutase.
- 3-fosfoglisarat kemudian diubah menjadi 1,3 bifosfoglisarat yang dikatalisis enzim fosfoglisarokinase.
- 1,3 bifosfoglisarat akan diubah menjadi gliseraldehida 3 fosfat, reaksi ini dikatalisis oleh enzim gliseraldehida 3 fosfat dehidrogenase.
- Gliseraldehida 3 fosfat dapat diubah menjadi dihidroksi aseton fosfat (dengan reaksi yang dapat bolak-balik) yang dikatalisis oleh enzim isomerase.
- Gliseraldehida 3 fosfat dan dihidroksi aseton fosfat akan disatukan dan menjadi fruktosa 1,6 bifosfat yang dikatalisis enzim enolase.

- Fruktosa 1,6 bifosfat akan diubah menjadi fruktosa 6 fosfat oleh enzim fruktosa difosfatase
- Fruktosa 6 fosfat akan diubah menjadi glukosa 6 fosfat oleh enzim fosfoglukoisomerase
- Dan terakhir glukosa 6 fosfat akan diubah menjadi glukosa yang dikatalisis oleh enzim glukosa 6 fosfatase. Asam amino glukogenik seperti alanin, arginin, asparagin, sistein, glutamate, histidin, metionin, prolin, serin, threonin, valin, dan triptofan dapat diubah menjadi glukosa setelah terlebih dahulu diubah menjadi piruvat atau senyawa antara yang lain.

Asam laktat hasil oksidasi anaerob juga dapat diubah menjadi glukosa setelah diubah menjadi oksaloasetat di dalam mitokondria. Gliserol hasil metabolisme lemak juga dapat diubah menjadi glukosa setelah terlebih dahulu diubah menjadi gliserol 3 fosfat kemudian menjadi dihidroksi aseton fosfat dan langkah-langkah selanjutnya.

Hormon kortisol akan memicu terjadinya glukoneogenesis saat tubuh mendeteksi kurangnya glukosa di dalam darah. Hormon tersebut terutama mempengaruhi perubahan asam amino glukogenik menjadi glukosa. Sedangkan hormon tiroksin akan mempengaruhi masuknya lemak ke dalam hati untuk dapat diubah menjadi glukosa.



Gambar 7. Siklus Cori perubahan glukosa pada sel otot dan perubahan asam laktat pada sel hati

## Referensi

Alberts,B. Et al.2010. Moleculer Biology of the Cell. New York : Garland Publising.

Bogen, HJ.2009. Modern Biology. London : Weindenfeld Nicolson.,

Subowo. 2012. Biologi Sel. Bandung : Pencetak/Penerbit Elstar Offset.

Yatim W. 2013. Biology Modern. Bandung : Penerbit transito.

Yatim W.2010. Biology Sel. Bandung ; Penerbit Transito.

<http://www.sainstekno.net/2018/11/20/mengenal-transpor-elektron>

Universitas  
**Esa Unggul**