



BIOLOGI

METABOLISME I

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi ini, kamu diharapkan memiliki kemampuan berikut.

1. Memahami pengertian dan jenis-jenis metabolisme.
2. Memahami komponen, cara kerja, dan sifat enzim.
3. Memahami nomenklatur, klasifikasi, dan faktor-faktor yang memengaruhi kerja enzim.
4. Memahami proses katabolisme, baik pada respirasi aerob maupun anaerob.

A. Pengantar Metabolisme

Metabolisme adalah proses penting yang terjadi di dalam tubuh setiap organisme yang masih hidup. Di dalam metabolisme, terjadi proses pemecahan dan penyusunan senyawa-senyawa kimia. Tujuan dari metabolisme adalah untuk memelihara kelangsungan hidup sel-sel penyusun tubuh organisme. Metabolisme dapat digolongkan menjadi dua, yaitu katabolisme dan anabolisme.

Katabolisme adalah proses pemecahan senyawa-senyawa organik (senyawa kompleks, misal gula) menjadi senyawa-senyawa anorganik (senyawa sederhana, misal CO_2 dan H_2O) agar diperoleh energi. Energi hasil katabolisme ini berupa senyawa yang disebut ATP (*Adenosin triphosphat*). ATP sangat dibutuhkan untuk berlangsungnya proses-proses di dalam tubuh, seperti regenerasi sel, pembelahan sel, pertumbuhan, dan perkembangan.

Kebalikan dari katabolisme adalah anabolisme. **Anabolisme** adalah proses penyusunan senyawa-senyawa anorganik (senyawa sederhana, misal H_2O dan CO_2) menjadi senyawa-senyawa organik (misal karbohidrat, lemak, dan protein) yang membutuhkan energi. Senyawa-senyawa organik inilah yang nantinya digunakan dalam proses katabolisme.

Metabolisme yang terjadi di dalam tubuh organisme berlangsung melalui reaksi-reaksi kimia yang rumit. Untuk mendukung agar reaksi-reaksi kimia tersebut dapat berjalan dengan baik, tubuh membentuk zat khusus yang disebut enzim. **Enzim** adalah suatu senyawa kimia yang dapat mempercepat reaksi kimia di dalam tubuh organisme. Oleh sebab itu, enzim disebut juga dengan **biokatalisator**. Hampir semua reaksi metabolisme dalam tubuh melibatkan enzim.

B. Komponen Enzim dan Cara Kerja Enzim

Enzim terdiri atas dua komponen utama, yaitu senyawa protein dan senyawa nonprotein. Senyawa protein penyusun enzim disebut **apoenzim**, sedangkan senyawa nonproteinnya disebut **kofaktor**. Ada tiga macam kofaktor, yaitu koenzim, ion-ion anorganik, dan gugus prostetik.

Koenzim adalah kofaktor berupa senyawa-senyawa organik yang berikatan renggang dengan enzim, seperti NAD^+ , FAD^+ , NADP^+ , atau turunan-turunan vitamin. Fungsi koenzim adalah untuk memindahkan gugus kimia, atom, atau elektron dari satu enzim ke enzim lainnya.

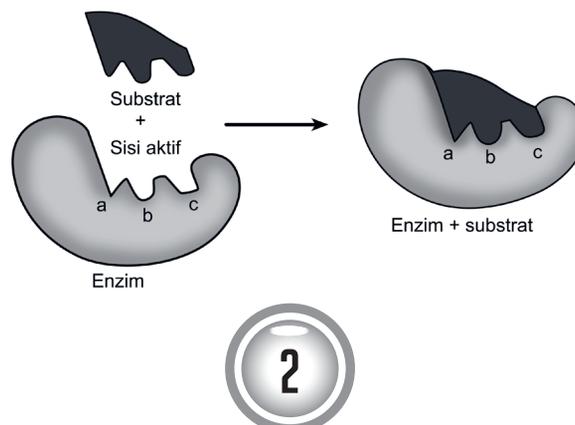
Ion-ion anorganik adalah kofaktor yang terikat dengan substrat kompleks atau enzim, sehingga fungsi enzim menjadi lebih efektif. Ion-ion anorganik tersebut umumnya berupa ion-ion logam seperti Fe^{2+} , Cu^{2+} , atau Mg^{2+} .

Gugus prostetik adalah kofaktor yang umumnya terikat kuat pada enzim dan sulit terurai. Gugus prostetik berfungsi memberi kekuatan tambahan terhadap kerja enzim. Contohnya adalah FAD (*Flavin Adenin Dinukleotida*) yang merupakan gugus prostetik dari enzim suksinat dehidrogenase, dan heme yang merupakan gugus prostetik dari enzim peroksidase.

Cara kerja enzim di dalam tubuh dapat dijelaskan dengan dua teori, yaitu sebagai berikut.

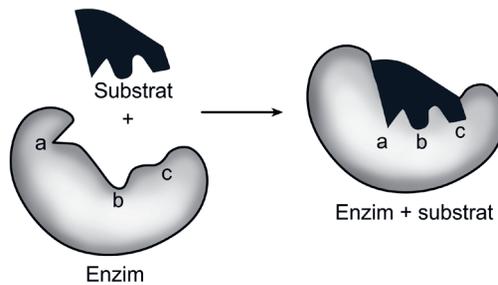
1. Teori Lock-Key

Teori ini dikemukakan oleh **Emil Fischer**. Menurut teori *lock-key*, sisi aktif enzim berperan seperti gembok, sedangkan substrat berperan seperti anak kunci. Jadi, untuk membentuk kompleks enzim-substrat, harus ada kesesuaian antara sisi aktif enzim dan substrat. Teori *lock-key* dapat digambarkan sebagai berikut.



2. Teori *Induced Fit*

Teori ini dikemukakan oleh **Daniel Koshland**. Menurut teori *induced fit*, setiap molekul substrat mempunyai bentuk permukaan yang hampir pas dengan permukaan sisi aktif enzim. Jika substrat masuk ke dalam sisi aktif enzim dan membentuk kompleks enzim-substrat, sisi aktif akan mengubah bentuknya sehingga sesuai dengan permukaan substrat tersebut. Teori *induced fit* dapat digambarkan sebagai berikut.



▶ Contoh Soal 1

Suatu enzim selalu tersusun atas dua komponen senyawa kimia. Senyawa kimia tersebut adalah

- A. protein dan protein
- B. protein dan koenzim
- C. koenzim dan kofaktor
- D. koenzim dan koenzim
- E. kofaktor dan kofaktor

Jawaban: B

Penjelasan:

Enzim selalu tersusun atas dua komponen senyawa kimia, yaitu protein yang disebut apoenzim dan nonprotein yang disebut kofaktor. Ada tiga macam kofaktor, yaitu koenzim, ion-ion anorganik, dan gugus prostetik. Ini berarti, suatu enzim dapat tersusun atas protein dan koenzim, protein dan ion-ion anorganik, atau protein dan gugus prostetik.

▶ Contoh Soal 2

Enzim akan mengalami kerusakan pada suhu tinggi. Hal ini terjadi karena

- A. enzim tersusun dari senyawa-senyawa yang mengandung logam
- B. enzim mengandung senyawa protein yang mudah rusak pada suhu tinggi
- C. enzim tersusun dari senyawa-senyawa organik

- D. enzim tersusun dari senyawa-senyawa anorganik
- E. enzim mengandung senyawa-senyawa nonlogam

Jawaban: B

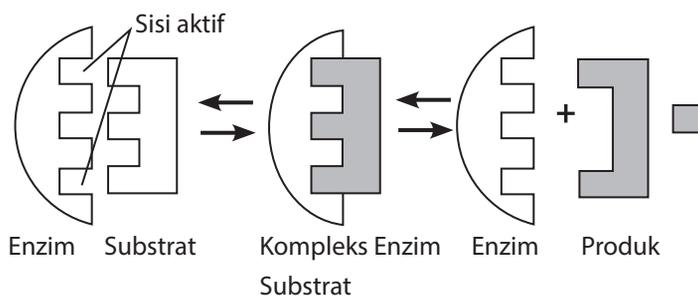
Penjelasan:

Salah satu komponen penyusun enzim adalah protein. Protein adalah senyawa yang mudah rusak jika berada pada suhu tinggi. Oleh sebab itu, enzim juga akan mengalami kerusakan jika berada pada suhu tinggi.

C. Sifat dan Ciri-Ciri Enzim

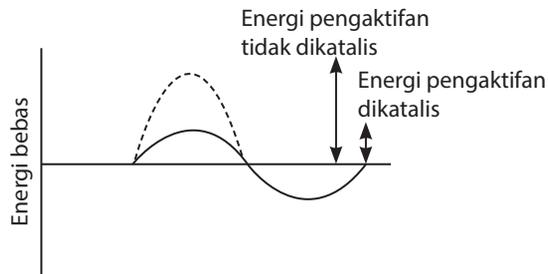
Enzim memiliki sifat dan ciri-ciri berikut.

1. Bekerja spesifik
Enzim hanya dapat bekerja terhadap substrat yang sesuai. Misalnya enzim lipase yang bekerja terhadap substrat lemak. Enzim lipase ini akan memecah lemak menjadi asam lemak dan gliserol.
2. Bekerja dalam jumlah sedikit
Enzim tetap dapat bekerja dengan baik pada substrat yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan jumlah enzimnya.
3. Dapat mempercepat reaksi tanpa ikut bereaksi
Dalam suatu reaksi kimia yang melibatkan enzim, tugas enzim hanya mempercepat reaksi, tetapi tidak ikut bereaksi. Jika reaksi telah berakhir, enzim akan dibentuk seperti semula. Sifat ini dapat dijelaskan dengan gambar berikut.



4. Bekerja bolak-balik
Enzim bekerja dalam dua arah (bolak-balik). Meskipun begitu, enzim tidak menentukan arah reaksi, tetapi hanya mempercepat sampai terjadinya kesetimbangan.
5. Memperkecil penggunaan energi aktivasi
Setiap reaksi kimia membutuhkan sejumlah energi untuk memulai reaksinya. Energi ini disebut **energi aktivasi**. Reaksi kimia yang tidak melibatkan enzim akan

memerlukan energi aktivasi yang besar, tetapi jika melibatkan enzim, energi aktivasi yang diperlukan menjadi lebih kecil. Untuk lebih jelasnya, perhatikan gambar berikut!



6. Merupakan suatu protein

Oleh karena enzim merupakan suatu protein, maka sifat enzim sama dengan sifat protein, yaitu tidak tahan terhadap panas tinggi. Enzim bekerja dengan baik pada suhu antara 30°C – 37°C, dan dapat bekerja lebih cepat pada suhu di atas 50°C. Namun, pada suhu antara 60°C – 70°C, kerja enzim mulai menurun.

Berdasarkan tempat kerjanya, enzim dibedakan menjadi dua, yaitu endoenzim dan eksoenzim.

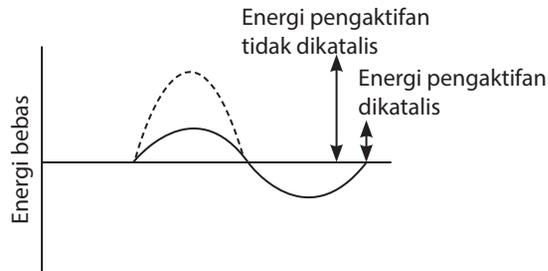
- a. **Endoenzim** atau disebut juga enzim *intraseluler* adalah enzim yang aktivitasnya di dalam sel.
Contoh: peroksidase.
- b. **Eksoenzim** atau disebut juga enzim *ekstraseluler* adalah enzim yang aktivitasnya di luar sel.
Contoh: amilase.

Pada umumnya, enzim tidak dapat bekerja tanpa senyawa nonprotein yang disebut **kofaktor**. Peran kofaktor dalam kerja enzim adalah sebagai berikut.

- a. Melengkapi dan memodifikasi struktur enzim sehingga substrat dapat melekat pada enzim.
- b. Bereaksi sebagai donor atom atau donor elektron bagi substrat.
- c. Bersama residu tertentu mempolarisasi substrat sehingga mudah dikatalisis oleh enzim.
- d. Sebagai akseptor sementara untuk atom, proton, atau elektron, dan akan kembali setelah reaksi berakhir.

▶ Contoh Soal 3

Perhatikan grafik yang menunjukkan hubungan pengaruh enzim terhadap pemanfaatan energi untuk reaksi kimia berikut!



Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa

- A. enzim menurunkan energi aktivasi
- B. enzim meningkatkan energi aktivasi
- C. energi aktivasi tidak memengaruhi kerja enzim
- D. energi aktivasi meningkatkan kerja enzim
- E. kerja enzim tidak ada hubungannya dengan energi aktivasi

Jawaban: A

Penjelasan:

Energi aktivasi atau energi pengaktifan adalah energi yang dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi kimia. Berdasarkan gambar, jumlah energi pengaktifan yang tidak dikatalis atau tidak melibatkan enzim akan lebih besar dibandingkan energi pengaktifan yang dikatalis. Oleh sebab itu, salah satu fungsi enzim adalah menurunkan penggunaan energi pengaktifan (energi aktivasi).

▶ Contoh Soal 4

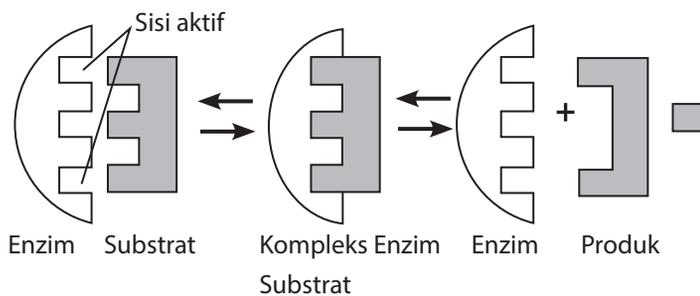
Berikut ini adalah sifat-sifat enzim, *kecuali*

- A. bekerja spesifik
- B. tidak memengaruhi kesetimbangan reaksi
- C. memperkecil penggunaan energi aktivasi
- D. di akhir reaksi berubah menjadi senyawa lain
- E. memiliki kisaran pH tertentu

Jawaban: D

Penjelasan:

Perhatikan gambar kerja enzim berikut ini!



Enzim adalah suatu *biokatalisator* di dalam tubuh organisme. Dalam bekerja, enzim tidak memengaruhi arah dan kesetimbangan reaksi, dan di akhir reaksi akan dibentuk kembali.

D. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kerja Enzim

Kerja enzim dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut di antaranya sebagai berikut.

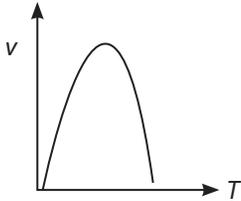
1. Suhu

Suhu sangat memengaruhi kerja enzim. Hal ini disebabkan enzim tersusun dari molekul-molekul protein, sehingga sifat enzim sama dengan sifat protein. Pada suhu yang sangat rendah, enzim tidak aktif. Akan tetapi, pada suhu yang sangat tinggi, enzim akan mengalami *denaturasi* (kerusakan).

Enzim pada tubuh manusia bekerja optimum pada suhu antara 37°C – 40°C. Pada hewan-hewan yang hidup di daerah kutub, enzim dapat bekerja optimum pada suhu yang lebih rendah. Sebaliknya, pada hewan-hewan yang hidup di daerah gurun, kisaran suhu optimumnya bisa lebih tinggi.

Pada tumbuhan, enzim bekerja optimum pada suhu sekitar 25°C. Jika suhu dinaikkan terus, kerja enzim akan meningkat. Akan tetapi, pada suhu antara 60°C – 70°C, kerja enzim akan menurun dan kemudian berhenti karena mengalami *denaturasi*.

Hubungan antara suhu (T) dan kecepatan kerja enzim (v) dapat digambarkan dalam grafik berikut.

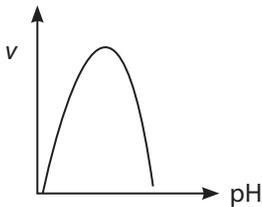


Semakin tinggi suhu, semakin cepat kerja enzim. Akan tetapi, setelah mencapai suhu tertinggi yang bisa ditolerir, peningkatan suhu akan menurunkan kerja enzim.

2. Derajat Keasaman (pH)

Setiap enzim membutuhkan pH tertentu. Jika enzim ditempatkan pada pH yang sesuai, kerja enzim akan optimal. Akan tetapi, jika enzim berada pada pH yang tidak sesuai, kerja enzim akan menurun atau mengalami kerusakan. Sebagai contoh, enzim pepsin yang terletak di lambung akan bekerja secara optimal pada pH rendah atau asam. Jika enzim ini dimasukkan ke dalam lingkungan yang netral atau basa, kerjanya tidak akan optimal atau bahkan mengalami kerusakan.

Hubungan antara pH dan kecepatan kerja enzim (v) dapat digambarkan dalam grafik berikut.



Semakin tinggi pH, semakin cepat kerja enzim. Akan tetapi, setelah mencapai pH tertinggi yang bisa ditolerir, peningkatan pH akan menurunkan kerja enzim.

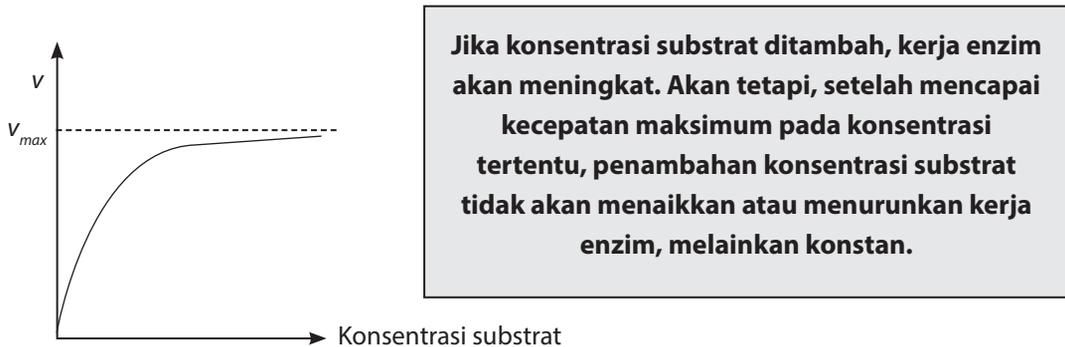
Berikut ini adalah tabel pH optimum untuk beberapa enzim.

No.	Nama Enzim	pH Optimum
1.	Amilase saliva (ptialin)	7,0 – 8,0
2.	Pepsin	1,5 – 1,6
3.	Lipase lambung	4,0 – 5,0
4.	Tripsin	7,8 – 8,7
5.	Amilase pankreas	6,7 – 7,0
6.	Lipase pankreas	8,0
7.	Katalase	7,0
8.	Maltase	6,1 – 6,8

3. Konsentrasi Substrat

Konsentrasi substrat akan memengaruhi kerja enzim. Jika konsentrasi substrat rendah, kerja enzim juga rendah. Jika konsentrasi substrat ditambah, kerja enzim akan meningkat. Namun, jika konsentrasi substrat terus ditambah hingga mencapai kecepatan maksimum, kerja enzim tidak akan mengalami penurunan atau peningkatan, melainkan konstan.

Hubungan antara konsentrasi substrat dan kecepatan kerja enzim (v) dapat digambarkan dalam grafik berikut.



4. Konsentrasi Enzim

Konsentrasi enzim akan memengaruhi kecepatan kerja enzim. Jika konsentrasi enzim tinggi, sedangkan konsentrasi substrat rendah, kerja enzim akan lebih cepat. Sampai batas tertentu, semakin tinggi konsentrasi enzim, semakin cepat kerja enzim.

Hubungan antara konsentrasi enzim dan kecepatan kerja enzim (v) dapat digambarkan dalam grafik berikut.



5. Zat *Inhibitor* dan Aktivator

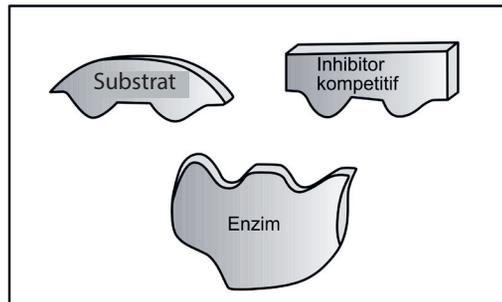
a. Zat *Inhibitor*

Zat *inhibitor* adalah zat yang dapat menghambat kerja enzim. Ada dua macam zat inhibitor, yaitu sebagai berikut.

1.) *Inhibitor* kompetitif

Inhibitor kompetitif adalah *inhibitor* yang dapat menempati sisi aktif enzim, seperti halnya substrat. Oleh karena itu, akan terjadi kompetisi antara substrat dan *inhibitor* tersebut. Jika enzim telah berikatan dengan *inhibitor*, enzim tidak dapat lagi berikatan dengan substratnya. Contohnya adalah enzim suksinat dehidrogenase yang memiliki substrat oseli suksinat. Ada dua *inhibitor* yang dapat berikatan dengan enzim tersebut, yaitu malonat dan oksalosuksinat.

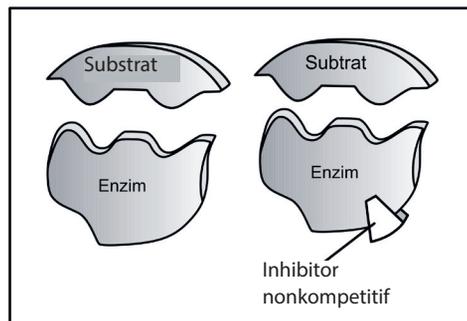
Cara kerja *inhibitor* kompetitif dapat dilihat pada gambar berikut.



2) *Inhibitor* nonkompetitif

Inhibitor nonkompetitif adalah *inhibitor* yang dapat berikatan dengan enzim pada sisi selain sisi aktif enzim. Adanya *inhibitor* nonkompetitif ini menyebabkan terjadinya perubahan bentuk pada sisi aktif, sehingga enzim tidak dapat lagi berikatan dengan substratnya. Contohnya adalah logam-logam berat seperti Hg^{2+} , Ag^+ , atau Pb^{2+} .

Cara kerja *inhibitor* nonkompetitif dapat dilihat pada gambar berikut.



b. Zat Aktivator

Zat aktivator adalah senyawa, unsur, atau ion yang dapat mempercepat kerja enzim. Sebagian besar zat aktivator adalah ion-ion anorganik. Sebagai contoh, enzim deoksiribonuklease dapat diaktivasi dengan baik oleh ion-ion Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , dan Co^{2+} , serta enzim ptialin yang dapat diaktivasi dengan baik oleh ion Cl^- .

Beberapa enzim juga dapat berperan sebagai aktivator bagi zimogen (enzim yang belum aktif). Contohnya adalah asam lambung (HCl) yang dapat mengaktifkan pepsinogen menjadi pepsin atau enzim enterokinase yang dapat mengaktifkan tripsinogen menjadi tripsin.

Contoh Soal 5

Jika suatu enzim bertemu dengan *inhibitor* nonkompetitif, hal yang akan terjadi adalah ...

- A. sisi aktif enzim tetap berfungsi baik
- B. sisi aktif enzim berubah, tetapi masih dapat berikatan dengan substratnya
- C. sisi aktif enzim berubah, dan enzim kehilangan fungsinya
- D. sisi aktif enzim tetap, tetapi kerjanya menurun
- E. sisi aktif enzim tetap, dan kerjanya menjadi lebih baik

Jawaban: C

Penjelasan:

Inhibitor nonkompetitif akan berikatan dengan sisi selain sisi aktif enzim. Adanya *inhibitor* nonkompetitif ini menyebabkan terjadinya perubahan bentuk pada sisi aktif, sehingga enzim tidak dapat lagi berikatan dengan substratnya. Contoh *inhibitor* nonkompetitif adalah logam berat seperti Hg^{2+} .

E. Nomenklatur dan Klasifikasi Enzim

Nomenklatur merupakan cara penamaan. Secara umum, cara penamaan enzim disesuaikan dengan nama substratnya, yaitu **nama substrat ditambah akhiran –ase**. Sebagai contoh, enzim pengurai amilum menjadi maltose diberi nama maltase. Namun, ada beberapa enzim yang diberi nama tanpa akhiran –ase, seperti pepsin, tripsin, dan renin. Untuk enzim pengurai lemak disebut lipase, karena nama lain untuk lemak adalah **lipid**.

Enzim dapat dikelompokkan menjadi beberapa golongan berdasarkan aspek penggolongannya. Berikut ini adalah tabel penggolongan enzim beserta fungsinya.

Tabel Penggolongan Enzim Beserta Fungsinya

No.	Aspek Penggolongan	Nama Enzim	Fungsi	Contoh
1.	Tempat bekerja	Endoenzim	Bekerja di dalam sel	Peroksidase
		Eksoenzim	Bekerja di luar sel	Amilase

No.	Aspek Penggolongan	Nama Enzim	Fungsi	Contoh
2.	Cara bekerja	Oksidoreduktase	Transfer elektron	Alkohol dehidrogenase, Katalase
		Transferase	Transfer gugus fungsi	Heksokinase
		Hidrolase	Reaksi hidrolisis	Tripsin
		Liase	Pemutusan ikatan C – C, C – O, C – N, dan membentuk ikatan rangkap	Piruvat dekarboksilase
		Isomerase	Memindahkan gugus di dalam molekul dan membentuk isomer	Maleat isomerase
		Ligase	Pembentukan ikatan	Piruvat dekarboksilase
3.	Jenis senyawa yang diuraikan	Karbohidrase	Pencernaan karbohidrat	Sukrase, maltase, dan amilase
		Protease	Pencernaan protein	Pepsin, renin, tripsin, dan enterokinase
		Esterase	Penguraian senyawa-senyawa ester	Lipase dan fosfatase
4.	Proses metabolisme	Katalase	Mengubah hidrogen peroksida menjadi H_2O dan O_2	
		Oksidase	Mempercepat penggabungan O_2 pada substrat atau reduksi O_2	

No.	Aspek Penggolongan	Nama Enzim	Fungsi	Contoh
		Karboksilase	Mengubah asam organik secara bolak-balik	Piruvat karboksilase
		Desmolase	Pemindahan atau penggabungan ikatan karbon	Aldolase
		Peroksidase	Membantu oksidasi senyawa fenolat, dan oksigen yang digunakan diambil dari H ₂ O ₂	
		Hidrase	Menambah atau mengurangi air dari senyawa tertentu	
		Dehidrogenase	Memindahkan hidrogen dari suatu zat ke zat lain	
		Transfosforilase	Memindahkan H ₃ PO ₄ dari satu molekul ke molekul lainnya yang dibantu oleh ion Mg ²⁺	

F. Katabolisme

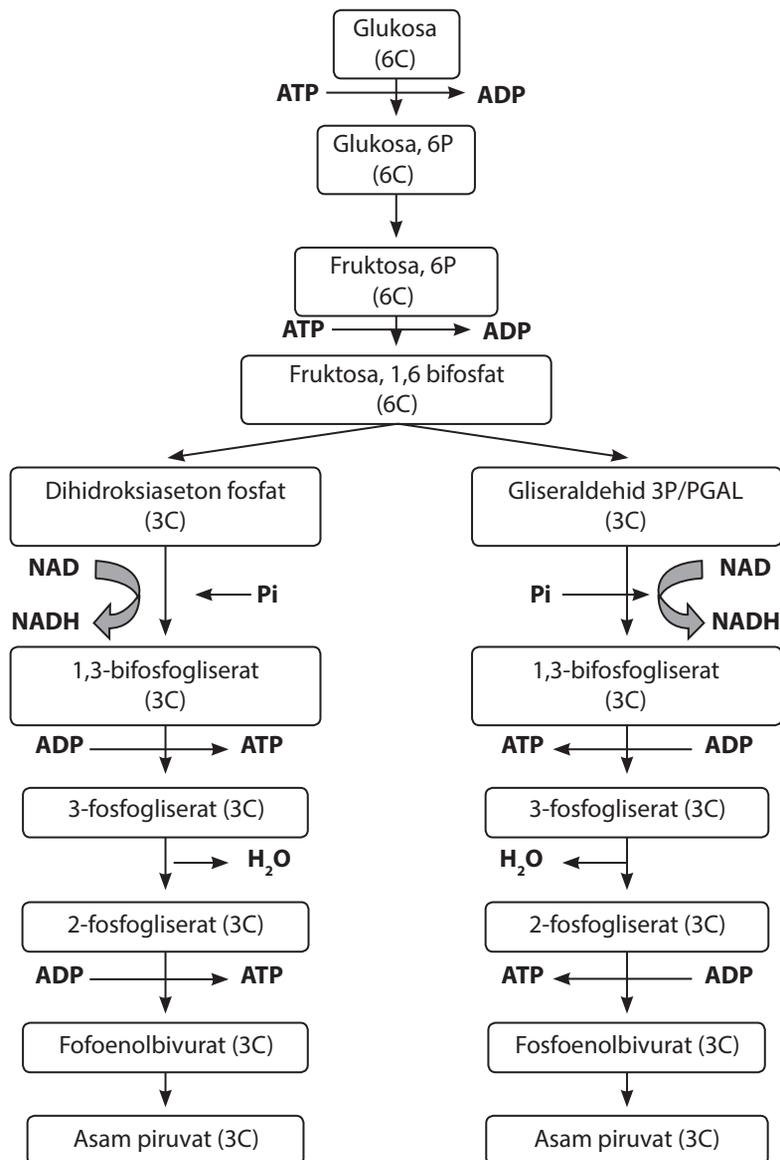
Proses katabolisme dapat diamati pada **respirasi intraseluler**. Ada dua macam respirasi intraseluler, yaitu respirasi aerob dan respirasi anaerob.

1. Respirasi Aerob

Respirasi aerob adalah proses respirasi yang membutuhkan oksigen bebas. Ada empat proses biokimia dalam respirasi aerob, yaitu glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus krebs, dan transpor elektron.

a. Glikolisis

Glikolisis merupakan proses awal dari respirasi aerob maupun anaerob. Di dalam glikolisis terjadi proses pemecahan glukosa menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Proses ini berlangsung di dalam sitosol atau sitoplasma. Setiap molekul glukosa yang mengalami proses glikolisis akan menghasilkan senyawa-senyawa yang terdiri atas **2 molekul ATP**, **2 molekul asam piruvat**, dan **2 molekul NADH (Nicotinamide Adenin Dinukleotida H)**. Proses glikolisis dapat digambarkan sebagai berikut.



Urutan dari proses glikolisis tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1.) Glukosa diubah menjadi glukosa, 6-fosfat. Tahap ini membutuhkan ATP sebagai sumber energi. ATP akan dipecah menjadi ADP.
- 2.) Glukosa, 6-fosfat diubah menjadi fruktosa, 6-fosfat.
- 3.) Fruktosa, 6-fosfat diubah menjadi fruktosa, 1,6-bifosfat dengan menggunakan ATP sebagai sumber energi. ATP akan dipecah menjadi ADP.
- 4.) Fruktosa, 1,6-bifosfat (6 atom C) dipecah menjadi 1 molekul gliseraldehid 3-fosfat atau PGAL (3 atom C) dan 1 molekul dihidroksiaseton fosfat atau DHAP (3 atom C). Molekul DHAP ini kemudian diubah menjadi senyawa PGAL, sehingga terbentuk 2 molekul PGAL.
- 5.) Setiap PGAL diubah menjadi senyawa 1,3-bifosfoglisarat dengan cara mengikat Pi (fosfat anorganik). Dalam reaksi ini, dibentuk molekul NADH.
- 6.) 1,3-bifosfoglisarat diubah menjadi 3-fosfoglisarat disertai pembentukan ATP.
- 7.) 3-fosfoglisarat diubah menjadi 2-fosfoglisarat.
- 8.) 2-fosfoglisarat diubah menjadi senyawa fosfoenolpiruvat (PEP).
- 9.) Fosfoenolpiruvat diubah menjadi asam piruvat disertai pembentukan ATP.

ATP yang diperoleh dari proses glikolisis akan digunakan untuk melakukan transpor aktif dari sitosol ke dalam mitokondria. Sementara itu, 2 molekul NADH yang diperoleh akan ditransfer ke transpor elektron. Secara sederhana, reaksi glikolisis dapat dituliskan sebagai berikut.



Contoh Soal 6

Peristiwa yang terjadi pada proses glikolisis adalah

- A. pemecahan glukosa menjadi PGAL
- B. pemecahan glukosa menjadi asam laktat
- C. pemecahan glukosa menjadi asam piruvat
- D. pemecahan glukosa menjadi alkohol
- E. pemecahan glukosa menjadi CO_2 dan H_2O

Jawaban: C

Penjelasan:

Glikolisis adalah tahapan awal dalam proses katabolisme, baik pada respirasi aerob maupun anaerob. Dalam proses ini, 1 molekul glukosa akan dipecah menjadi 2 molekul asam piruvat, 2 senyawa NADH, dan 2 ATP.

 **Contoh Soal 7**

Asam piruvat terbentuk baik pada respirasi aerob maupun anaerob. Pada reaksi aerob, asam piruvat akan

- A. dijadikan asam laktat
- B. disintesis menjadi molekul yang lebih besar
- C. masuk ke dalam siklus asam trikarboksilat (daur Krebs)
- D. berubah menjadi etil alkohol
- E. berubah menjadi asetaldehid

Jawaban: C

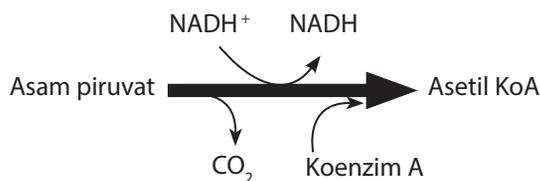
Penjelasan:

Asam piruvat adalah senyawa yang terbentuk dari proses glikolisis. Jika terdapat oksigen yang cukup (reaksi aerob), asam piruvat akan diubah menjadi senyawa asetil koA dan masuk ke dalam siklus asam trikarboksilat (siklus Krebs). Namun, jika tidak tersedia oksigen (reaksi anaerob), asam piruvat akan diubah menjadi alkohol atau asam laktat dalam proses fermentasi.

b. Dekarboksilasi Oksidatif dan Siklus Krebs

Asam piruvat yang masuk ke dalam mitokondria akan diubah menjadi senyawa asetil koenzim A atau asetil koA melalui proses **dekarboksilasi oksidatif**. Selain itu, akan dihasilkan juga molekul CO₂ dan NADH dari proses tersebut.

Satu molekul asam piruvat akan menghasilkan **1 molekul asetil koA, 1 molekul CO₂, dan 1 molekul NADH**. Oleh karena asam piruvat yang diperoleh dari reaksi sebelumnya berjumlah dua molekul, maka terjadi dua kali reaksi dekarboksilasi oksidatif. Akibatnya, hasil yang diperoleh juga menjadi dua kali lipat. Proses dekarboksilasi oksidatif dapat digambarkan sebagai berikut.



Urutan proses dekarboksilasi oksidatif tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

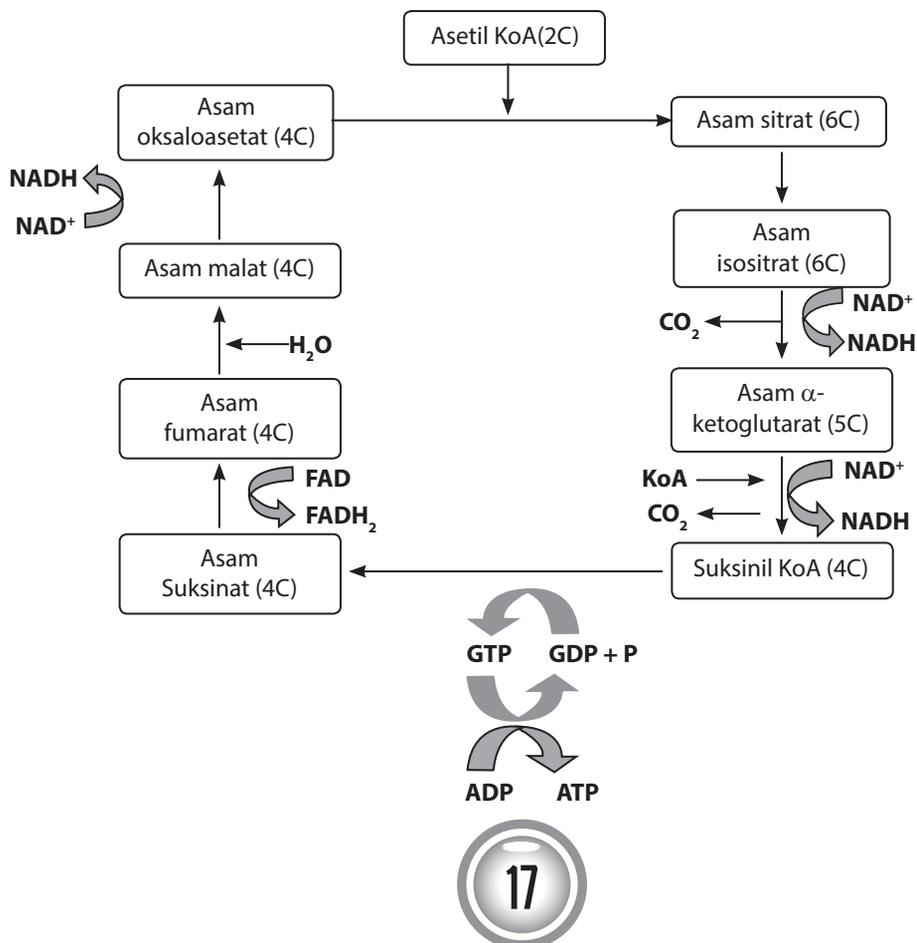
- 1.) Asam piruvat melepaskan gugus karboksilat (COO^-) yang kemudian diubah menjadi CO_2 .
- 2.) Sisa atom C dalam bentuk CH_3COO^- akan mentransfer kelebihan elektronnya pada molekul NAD^+ , sehingga terbentuk NADH . Sementara itu, CH_3COO^- berubah menjadi asetat.
- 3.) Koenzim A akan berikatan dengan asetat membentuk asetil koenzim A atau asetil KoA.

Secara sederhana, reaksi dekarboksilasi oksidatif dapat dituliskan sebagai berikut.



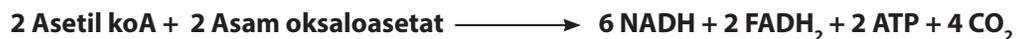
Asetil koA merupakan senyawa yang diperlukan untuk berlangsungnya **siklus Krebs**. Siklus ini juga berlangsung di dalam matriks mitokondria. Oleh karena asetil KoA yang bereaksi ada dua molekul, maka siklus Krebs akan berlangsung dua kali. Dari dua kali siklus Krebs ini akan diperoleh hasil berupa **2 molekul ATP, 6 molekul NADH, 2 molekul FADH₂**, dan **4 molekul CO₂**. Proses siklus Krebs dapat digambarkan sebagai berikut.

Urutan proses siklus Krebs tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.



- 1.) Asetil koA (2 atom C) berikatan dengan asam oksaloasetat (4 atom C) membentuk asam sitrat (6 atom C).
- 2.) Asam sitrat kemudian diubah menjadi asam isositrat.
- 3.) Asam isositrat (6 atom C) diubah menjadi asam α -ketoglutarat (5 atom C). Dalam reaksi ini dilepaskan CO_2 dan dibentuk NADH.
- 4.) Asam α -ketoglutarat (5 atom C) diubah menjadi suksinil koA (4 atom C). Dalam reaksi ini juga dilepaskan CO_2 dan dibentuk NADH.
- 5.) Suksinil koA selanjutnya akan diubah menjadi asam suksinat (4 atom C). Dalam reaksi ini dihasilkan GTP yang kemudian berubah menjadi ATP.
- 6.) Asam suksinat diubah menjadi asam fumarat (4 atom C), dan menghasilkan senyawa FADH_2 .
- 7.) Asam fumarat diubah menjadi asam malat (4 atom C) yang dilakukan dengan penambahan air.
- 8.) Asam malat diubah menjadi asam oksaloasetat kembali, dan menghasilkan senyawa NADH.

Secara sederhana, reaksi siklus Krebs dapat dituliskan sebagai berikut.



Contoh Soal 8

Pada proses dekarboksilasi oksidatif, CO_2 yang dihasilkan berasal dari

- A. asetil koenzim A
- B. gugus karboksilat asam piruvat
- C. senyawa asetat
- D. asetaldehid
- E. fosfogliseraldehid

Jawaban: B

Penjelasan:

Pada proses dekarboksilasi oksidatif, asam piruvat akan melepaskan gugus karboksilatnya yang kemudian diubah menjadi CO_2 .

Jadi, CO_2 yang dihasilkan pada proses dekarboksilasi oksidatif berasal dari gugus karboksilat asam piruvat.

Contoh Soal 9

Senyawa yang hanya dihasilkan dalam siklus Krebs adalah

- A. NADH
- B. ATP
- C. CO_2
- D. asetil KoA
- E. FADH_2

Jawaban: E

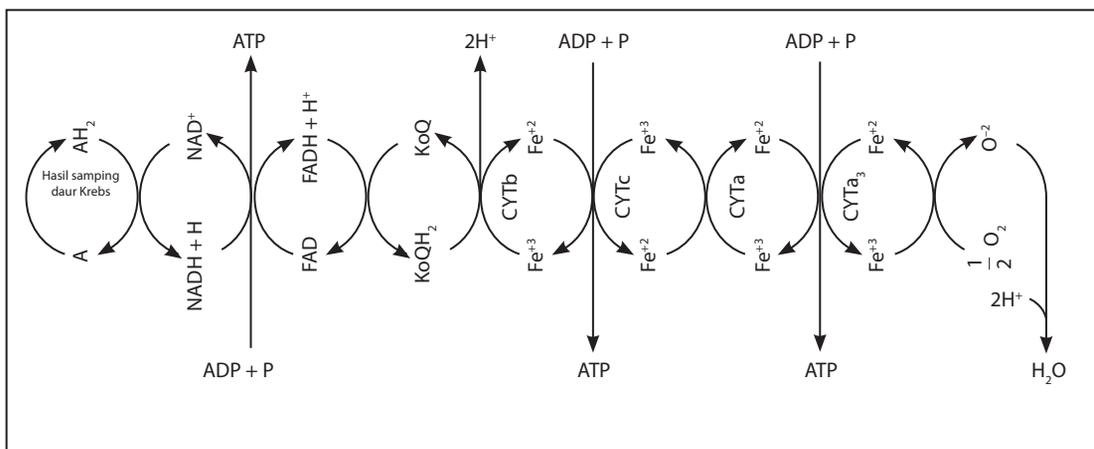
Penjelasan:

Senyawa yang hanya dihasilkan dalam siklus Krebs adalah FADH_2 . Senyawa ini terbentuk saat proses perubahan asam suksinat menjadi asam fumarat.

d. Transpor Elektron

Transpor elektron merupakan tahap akhir dari proses respirasi aerob. Dalam proses ini dihasilkan energi dalam bentuk ATP dengan jumlah yang paling banyak daripada reaksi-reaksi sebelumnya.

Transpor elektron berlangsung di dalam **krista** (membran dalam) mitokondria, dan merupakan suatu proses reduksi-oksidasi dua senyawa. Senyawa tersebut adalah NADH dan FADH_2 yang diperoleh dari reaksi sebelumnya. Dalam transpor elektron juga akan terlibat beberapa molekul seperti koenzim Q (*ubiquinon*), sitokrom B, sitokrom C, sitokrom A, sitokrom A_3 , dan oksigen. Proses transpor elektron dapat digambarkan sebagai berikut.



Urutan proses transpor elektron tersebut adalah sebagai berikut.

- 1.) NADH mengalami oksidasi, sehingga dihasilkan elektron berenergi tinggi yang akan ditransfer ke koenzim Q. Energi yang cukup tinggi dari elektron ini memungkinkan bersatunya ADP dan fosfat anorganik membentuk ATP.
- 2.) Koenzim Q akan dioksidasi oleh sitokrom B. Pada tahap ini, koenzim Q akan melepas elektron dan 2 ion H^+ .
- 3.) Sitokrom B akan dioksidasi oleh sitokrom C. Pada tahap ini juga dihasilkan energi yang cukup tinggi, sehingga terjadi penyatuan ADP dan fosfat anorganik menjadi ATP.
- 4.) Sitokrom C akan mereduksi sitokrom A.
- 5.) Sitokrom A akan mengoksidasi sitokrom A_3 . Pada tahap ini juga terjadi penyatuan ADP dan fosfat organik menjadi ATP.
- 6.) Sitokrom A_3 akan dioksidasi oleh sebuah atom oksigen. Setelah menerima elektron dari sitokrom A, oksigen akan bergabung dengan ion H^+ (hasil dari oksidasi koenzim Q oleh sitokrom B), sehingga terbentuk molekul H_2O . Oksigen di sini berperan sebagai akseptor terakhir ion H^+ .
- 7.) Dari proses transpor elektron yang diawali dengan oksidasi NADH, akan diperoleh **3 ATP dan 1 H_2O** .
- 8.) Hal yang sama juga terjadi pada $FADH_2$. Bedanya, energi yang dihasilkan saat oksidasi $FADH_2$ tidak cukup tinggi untuk membentuk ATP. Oleh sebab itu, proses transpor elektron yang berawal dari oksidasi $FADH_2$ hanya memperoleh **2 ATP dan 1 H_2O** . Secara sederhana, pembentukan ATP dari NADH dan $FADH_2$ dapat dituliskan sebagai berikut.

Oksidasi 1 NADH akan menghasilkan 3 ATP
Oksidasi 1 $FADH_2$ akan menghasilkan 2 ATP

Jika jumlah total NADH yang diperoleh mulai dari glikolisis sampai siklus Krebs adalah 10 molekul dan $FADH_2$ 2 molekul, pada transpor elektron akan diperoleh hasil sebagai berikut.



Jadi, dalam proses transpor elektron akan dihasilkan **34 ATP** dan **12 H₂O**. Dari hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa transpor elektron merupakan penyumbang ATP terbanyak dalam proses respirasi aerob.

Dengan menjumlahkan seluruh ATP yang dihasilkan dari respirasi aerob ini, yaitu 2 ATP dari glikolisis, 2 ATP dari siklus Krebs, dan 34 ATP dari transpor elektron, total ATP yang diperoleh adalah 38 ATP. Namun, karena 2 ATP yang berasal glikolisis telah digunakan untuk proses transpor aktif dari sitosol ke mitokondria, maka hasil bersih respirasi aerob dari 1 molekul glukosa adalah **36 ATP** dan **12 H₂O**. Berikut ini adalah tabel jumlah ATP yang diperoleh selama berlangsungnya proses respirasi aerob.

Tabel Jumlah ATP yang Diperoleh Selama Berlangsungnya Proses Respirasi Aerob

Reaksi	Jumlah
Glikolisis	2 ATP (langsung digunakan untuk transpor aktif)
Dekarboksilasi oksidatif	-
Siklus Krebs	2 ATP
Transpor elektron	34 ATP
TOTAL	36 ATP

Contoh Soal 10

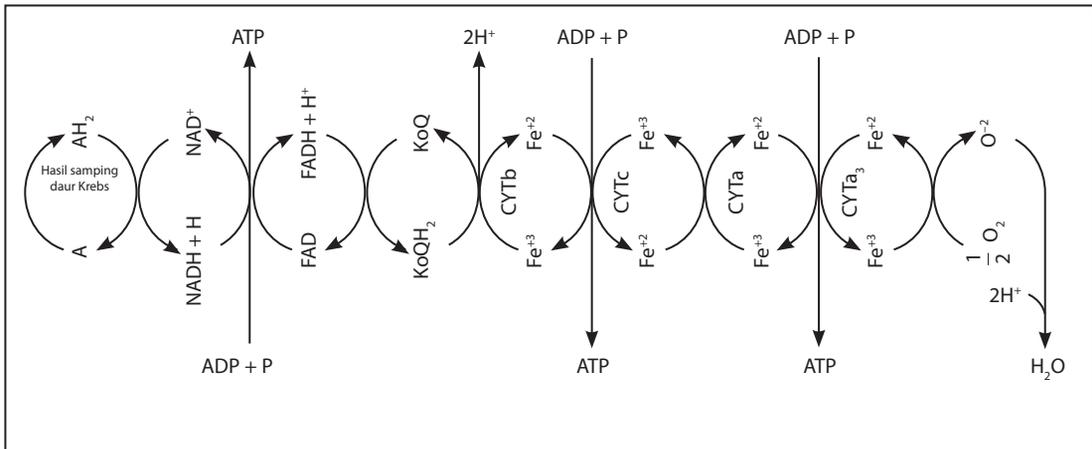
Senyawa-senyawa yang digunakan dalam tahapan transpor elektron pada proses respirasi sel sehingga dihasilkan ATP dan H₂O adalah

- A. asam piruvat
- B. NADH dan FADH₂
- C. asetil koA
- D. PGAL
- E. asam sitrat

Jawaban: B

Penjelasan:

Perhatikan gambar proses transpor elektron berikut ini!



Pada proses transpor elektron, dibutuhkan senyawa $NADH$ dan $FADH_2$. Keduanya akan melepaskan ion H^+ dan elektron dalam reaksi tersebut. Pada setiap oksidasi, 1 molekul $NADH$ akan menghasilkan 3 molekul ATP dan 1 molekul $FADH_2$ akan menghasilkan 2 molekul ATP.

Jadi, senyawa-senyawa yang digunakan dalam tahapan transpor elektron $NADH$ dan $FADH_2$.

Contoh Soal 11

Pada proses oksidasi $FADH_2$ tidak terbentuk ATP. Hal ini terjadi karena

- A. ketersediaan ADP hanya sedikit
- B. elektron yang dibutuhkan cukup besar
- C. energi yang diperoleh kecil
- D. ketersediaan fosfat anorganik sedikit
- E. oksidasi $FADH_2$ hanya melepaskan ion H^+

Jawaban: C

Penjelasan:

Pada proses oksidasi $FADH_2$, energi yang diperoleh tidak cukup untuk menyatukan ADP dan fosfat anorganik, sehingga tidak terbentuk ATP. Hal ini berbeda dengan oksidasi $NADH$ yang dapat menghasilkan ATP.

Jadi, pada proses oksidasi $FADH_2$ tidak terbentuk ATP karena energi yang diperoleh kecil.

2. Respirasi Anaerob

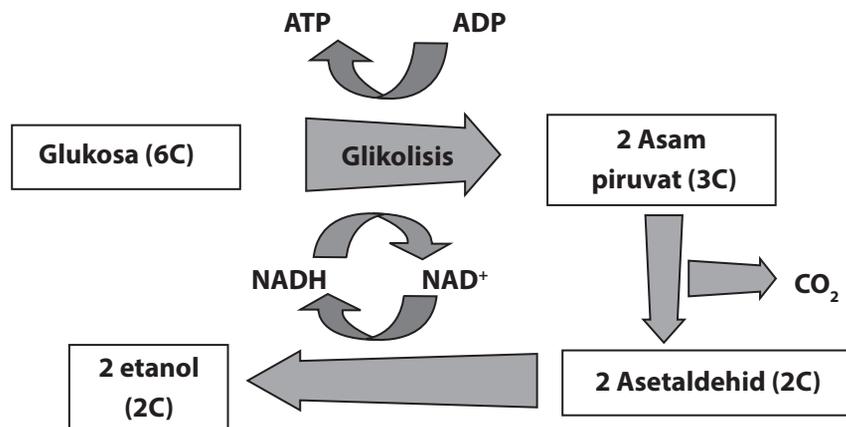
Respirasi anaerob adalah proses respirasi yang tidak memerlukan oksigen bebas. Proses ini disebut juga **fermentasi**. Respirasi anaerob dapat terjadi pada manusia dan hewan ketika tubuh sedang membutuhkan energi dengan cepat. Selain itu, respirasi anaerob juga dapat dilakukan oleh beberapa mikroorganisme seperti jamur dan bakteri.

Persamaan antara respirasi anaerob dan respirasi aerob hanya terletak pada tahap glikolisis. Oleh karena pada respirasi anaerob tidak tersedia oksigen yang cukup, maka asam piruvat yang dihasilkan pada tahap glikolisis tidak diubah menjadi asetil koA. Akan tetapi diubah menjadi senyawa lain melalui proses fermentasi. Ada dua macam fermentasi, yaitu fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat.

a. Fermentasi Alkohol

Fermentasi alkohol dilakukan oleh beberapa organisme tingkat rendah seperti jamur dan bakteri. Sebagai contoh, jamur ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) dapat menfermentasi gula menjadi alkohol. Kemampuan jamur ini kemudian dimanfaatkan oleh manusia untuk membuat minuman beralkohol atau membuat roti sejak ribuan tahun yang lalu.

Fermentasi alkohol dimulai dengan proses glikolisis seperti pada respirasi aerob. Dari proses ini akan dihasilkan 2 asam piruvat, 2 ATP, dan 2 NADH. Proses selanjutnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Urutan proses fermentasi alkohol tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1.) Glukosa mengalami proses glikolisis, sehingga dihasilkan 2 asam piruvat, 2 ATP, dan 2 NADH.
- 2.) Asam piruvat diubah menjadi asetaldehid dengan melepas CO_2 .
- 3.) NADH melepaskan elektron dan ion H^+ menjadi NAD^+ . Elektron dan ion H^+ akan bergabung dengan asetaldehid membentuk alkohol.

- 4.) NAD^+ akan digunakan kembali pada proses glikolisis.
- 5.) Hasil akhir dari fermentasi alkohol adalah **2 etanol, 2 ATP, dan 2 CO_2** .

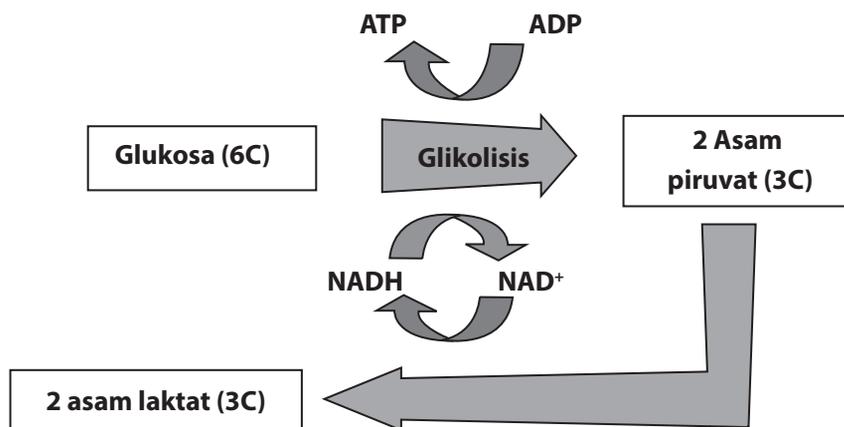
Fermentasi alkohol dapat merugikan organisme yang melakukannya. Hal ini disebabkan karena alkohol yang dihasilkan dapat membunuh organisme tersebut. Selain itu, dari perolehan energi juga sangat sedikit, hanya berupa ATP yang diperoleh dari proses glikolisis.

b. Fermentasi Asam Laktat

Fermentasi asam laktat terjadi di dalam sel-sel otot manusia. Fermentasi ini biasa terjadi saat otot membutuhkan pasokan energi dalam waktu yang cepat, yaitu saat melakukan kontraksi. Terbentuknya asam laktat di dalam otot dapat menimbulkan kelelahan otot. Oleh sebab itu, asam laktat disebut juga **asam lelah**. Asam laktat yang terbentuk di dalam otot akan dibawa ke hati untuk diubah kembali menjadi asam piruvat.

Selain pada manusia, fermentasi asam laktat juga dapat dilakukan oleh bakteri asam laktat, misalnya *Lactobacillus*. Bakteri *Lactobacillus* dapat menfermentasi susu menjadi keju atau *yoghurt*. Kemampuan bakteri ini juga telah dimanfaatkan manusia dalam industri pengolahan susu menjadi produk-produk fermentasi yang bermanfaat.

Fermentasi asam laktat juga dimulai dari proses glikolisis yang menghasilkan 2 asam piruvat, 2 ATP, dan 2 NADH. Proses selanjutnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Urutan proses fermentasi asam laktat tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1.) Glukosa mengalami glikolisis, sehingga dihasilkan 2 asam piruvat, 2 ATP, dan 2 NADH.
- 2.) Asam piruvat akan direduksi oleh NADH menjadi asam laktat, tanpa membebaskan CO_2 .
- 3.) NAD^+ yang terbentuk akan digunakan kembali dalam proses glikolisis.
- 4.) Hasil akhir dari proses fermentasi asam laktat adalah **2 ATP** dan **2 asam laktat**.

Contoh Soal 12

Persamaan antara fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat adalah sebagai berikut, kecuali

- A. tidak menghasilkan molekul air
- B. menghasilkan 2 molekul ATP
- C. tidak memerlukan oksigen bebas
- D. hanya melewati tahap glikolisis
- E. menghasilkan karbon dioksida

Jawaban: E

Penjelasan:

Fermentasi alkohol menghasilkan 2 etanol, 2 ATP, dan 2CO_2 . Sementara fermentasi asam laktat menghasilkan 2 ATP dan 2 asam laktat. Dengan demikian, yang bukan persamaan antara fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat adalah menghasilkan karbon dioksida.

• Super "Solusi Quipper" •

GULA DAN BUAH PIR DIMAKAN ASEP DAN UCOK BERSAMA ENO

(Glukosa \rightarrow asam piruvat \rightarrow asetaldehid dan $\text{CO}_2 \rightarrow$ etanol)

GULA DAN BUAH PIR DIMAKAN DENGAN LAKSA

(glukosa \rightarrow asam piruvat \rightarrow asam laktat)

Contoh Soal 13

Saat melakukan proses respirasi anaerob, sel-sel ragi akan menghasilkan zat-zat berikut ini, *kecuali*

- A. karbon dioksida
- B. air
- C. asetaldehid
- D. etanol
- E. ATP

Jawaban: B

Penjelasan:

Tahapan transpor elektron tidak terjadi pada respirasi anaerob. Transpor elektron merupakan tahapan yang dapat menghasilkan molekul air. Dengan demikian, zat yang tidak dihasilkan oleh sel-sel ragi saat melakukan proses respirasi anaerob adalah air.