

BAB IX

RESPIRASI

Kompetensi Dasar:

1. Mampu menjelaskan pengertian respirasi.
2. Mampu menjabarkan energi yang diperoleh dari respirasi aerob lebih besar dari respirasi an aerob.
3. Mahasiswa mampu menjabarkan reaksi pada tahap glikolisis.

Semua sel aktif senantiasa melakukan respirasi, menyerap O_2 dan melepaskan CO_2 dalam volume yang sama. Proses keseluruhan merupakan reaksi oksidasi reduksi yaitu senyawa dioksidasi menjadi CO_2 sedangkan O_2 yang diserap direduksi membentuk H_2O . Pati, fruktan, sukrosa, lemak, asam organik, bahkan pada keadaan tertentu protein dapat digunakan sebagai substrat respirasi. Reaksi respirasi glukosa dapat ditulis sebagai berikut :



Sebagian besar energi yang dilepaskan selama respirasi sekitar 2870 KJ atau 686 Kkal per mol glukosa berupa bahang. Bila suhu rendah bahang ini dapat merangsang metabolisme dan mengunikan bagi beberapa spesies tertentu. Yang lebih penting dari bahang adalah energi yang terhimpun dalam ATP, sebab senyawa ini digunakan untuk berbagai proses esensial tertentu.

Respirasi merupakan oksidasi yang berlangsung di medium air, dengan pH netral pada suhu sedang. Produk ini meliputi asam amino untuk protein; nukleotida untuk asam nukleat; dan prazat karbon untuk pigmen porfirin; untuk lemak, sterol karatenoid, pigmen flavonoid, seperti antosianin, dan senyawa aromatic tertentu.

Biasanya hanya beberapa substrat respirasi yang dioksidasi seluruhnya menjadi CO_2 dan H_2O sedangkan sisanya digunakan dalam proses sintesis.

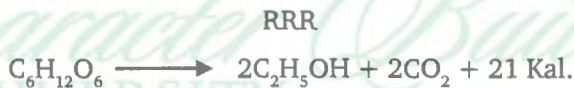
Energi yang ditangkap dari proses oksidasi sempurna beberapa senyawa dapat digunakan untuk mensintesis molekul lain yang dibutuhkan untuk pertumbuhan. Laju respirasi meningkat sebagai akibat dari permintaan pertumbuhan, tapi dari beberapa senyawa yang hilang dialihkan ke dalam beberapa reaksi sintesis dan tidak pernah muncul sebagai CO_2 .

Respirasi Anaerob.

Respirasi anaerob dapat berlangsung di dalam udara yang bebas, tetapi proses ini tidak menggunakan O_2 yang tersedia di dalam udara itu. Respirasi anaerob juga lazim disebut fermentasi, meskipun tidak semua fermentasi itu anaerob. Tujuan fermentasi sama dengan tujuan respirasi yaitu untuk memperoleh energi. Energi yang didapat melalui fermentasi lebih sedikit dibandingkan dengan respirasi biasa.

Fermentasi banyak terjadi pada peragian alkohol atau alkoholisasi. Meskipun pembuatan minuman keras itu telah dikenal sejak permulaan sejarah manusia, namun baru pada abad ke 19 diketahui orang bahwa alkohol yang timbul itu disebabkan oleh mikroorganisme bersel satu yang disebut ragi (*Saccharomyces*) peristiwa ini ditemukan oleh Pasteur (1857). Kemudian Buchner (1896) membuktikan bahwa alkoholisasi tidak mutlak dilakukan oleh sel-sel ragi yang masih hidup. Ternyata sel-sel yang sudah mati dapat juga melangsungkan peristiwa tersebut. Dengan demikian jelaslah bahwa ragi-ragi itu mengandung zat-zat yang menyelenggarakan alkoholisasi tersebut yang disebut dengan zimase.

Sel-sel ragi merupakan mikroorganisme yang mendapatkan energi yang dibutuhkan dengan cara respirasi anaerob. Substrat yang terbongkar berupa heksosa namun heksosa ini tidak terurai menjadi H_2O dan CO_2 . persamaannya dituliskan sebagai berikut :



Fruktosa, galaktosa dan manosa dapat langsung dialkoholisasikan oleh sel-sel ragi kecuali glukosa, disakarida juga dapat dialkoholisasi (misal maltosa dan sukrosa dapat dijadikan substrat). Substrat ini kemudian diubah menjadi monosakarida oleh enzim-enzim maltase dan sukrase: enzim-enzim ini juga dimiliki oleh sel-sel ragi.

Dari persamaan reaksi seperti disebut diatas ini nyatalah, bahwa O_2 tidak diperlukan ; juga didalam proses ini hanya ada perubahan zat organik yang satu menjadi zat organik yang lain (gula alkohol), dimana pada hakekatnya hanya ada pergeseran tempat – tempat antara molekul glukosa dan molekul alkohol.

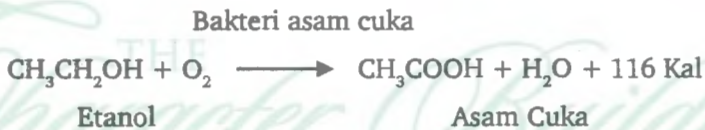
Oleh karena itu, maka respirasi semacam ini dapat juga disebut respirasi intramolekul, mengingat bahwa perubahan semacam ini hanya terdapat di dalam molekul saja.

Dipandang dari segi perindustrian, alangkah baiknya jika semua heksosa yang tersedia itu dapat diubah seluruhnya menjadi alkohol sekali jadi. Hal ini sayang benar tidak mungkin, sebab sel-sel ragi itu mengalami keracunan, apabila kadar alkohol tempat mereka hidup itu melebihi suatu persenan. Bagi beberapa jenis ragi persenan itu ada diantara 9% - 18%. Jika persenan alkohol lebih tinggi daripada itu , maka terhentilah peristiwa alkoholisasi.

Banyak mikroorganisme lainnya mendapat energi yang diperlukannya dengan jalan fermentasi juga, dimana sebagai substrat digunakannya macam-macam asam organik. Perubahan zat organik yang satu menjadi zat organik yang lainnya yang lebih rendah simpanan energinya itu dilakukan oleh bakteri-bakteri anaerob, tetapi juga oleh jaringan-jaringan tanaman tinggi oleh biji – bijian yang kulitnya sukar ditembus O_2 .

Bakteri asam cuka adalah suatu contoh mikroorganisme yang mengadakan fermentasi dengan menggunakan oksigen bebas, seperti dinyatakan di dalam persamaan berikut ini, sedang energi yang didapatnya lebih dari lima kali energi yang diperoleh sel-sel ragi dalam fermentasinya secara anaerob.

Demikianlah peristiwa percukaan :



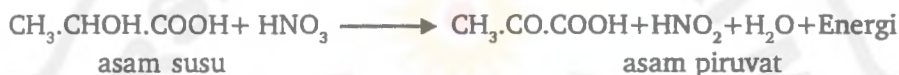
Bakteri asam susu sebaliknya, mengadakan fermentasi anaerob, dimana heksosa yang terdapat didalam air susu diubahnya menjadi asam susu, sedang bakteri beroleh sejumlah energi juga seperti dinyatakan didalam persamaan dibawah ini :

Bakteri asam susu



Seperti halnya dengan peristiwa alkoholisasi oleh *Saccharomyces*, maka terjadinya asam susu ini suatu peristiwa respirasi intramolekul juga. Respirasi intramolekul berlangsung dengan pertolongan enzim semata-mata, oleh karena itu peristiwa dapat juga disebut fermentasi.

Beberapa spesies bakteri dapat mengadakan respirasi antarmolekul. Oksigen yang diperlukan tidak diperoleh dari udara bebas, melainkan dari suatu persenyawaan. Contoh :



Proses Respirasi Anaerob Pada Jaringan–Jaringan Tanaman Tinggi.

Pada umumnya, respirasi anaerob pada jaringan – jaringan dalam tubuh tanaman tinggi itu hanya terjadi jika persediaan oksigen bebas ada dibawah minimum. Tiap jaringan tanaman mempunyai lain tanggapan terhadap ini. Kecambah jagung misalnya tidak dapat mempertahankan hidupnya di dalam suatu tempat yang tidak ada oksigennya sama sekali, sedang buah–buah apel dan peer dapat bertahan berbulan–bulan didalam penyimpanan, dimana hanya ada hidrogen atau nitrogen saja. Buah–buah tersebut ini terus– menerus menghasilkan CO_2 , suatu tanda buah–buah itu mengadakan terus.

Selanjutnya, respirasi anaerob berlangsung pada biji–bijian seperti jagung, kacang, padi, biji bunga matahari dan lain–lainnya lagi yang tampak kering. Akan tetapi pada buah–buahan yang basah mendaging, jaringan–jaringan tanaman tinggi tersebut kebanyakan bukan alkohol, melainkan bermacam–macam asam organik seperti asam sitrat, asam malat, asam oksalt, asam tartarat dan asam susu.

Pada banyak tanaman yang biasa tumbuh di darat, penggenangan dalam air yang agak lama itu merupakan suatu ancaman bagi kehidupannya. Respirasi aerob terhenti sama sekali sedang respirasi anaerob tidak mungkin mencukupi energi yang dibutukannya juga akumulasi dari hasil akhir respirasi itu lama–kelamaan merupakan racun bagi jaringan–jaringan yang tersangkut.

Sebaliknya pada tanaman air, respirasi aerob dapat berlangsung terus menerus karena adanya pembuluh – pembuluh hawa yang merupakan aerenkim, jadi meskipun selalu berada didalam air, tanaman tersebut tak perlu melakukan pernapasan anaerob, kecuali jika keadaan memaksa. Hal ini dapat diketahui

dari sikap akar dan rhizoma dari *Nymphaea advena* dan beberapa tanaman air lainnya yang mampu mengadakan kedua macam respirasi menurut kebutuhan.

Pada umumnya dapatlah dikatakan, bahwa jaringan ataupun mikroorganismenya yang dapat melangsungkan respirasi anaerob itu lebih mengutamakan respirasi aerob jika ada kesempatan, sebab dengan respirasi aerob dapat diperoleh lebih banyak energi daripada dengan jalan respirasi anaerob. Perubahan sikap yang demikian ini disebut efek Pasteur.

Sebenarnya perubahan heksosa menjadi CO_2 dan H_2O atau menjadi etanol maupun menjadi asam susu itu tidak berlangsung sekali jadi, melainkan bertingkat – tingkat.

Proses Pertukaran Gas Respirasi.

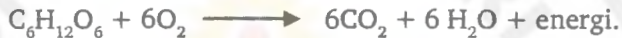
Betapa giatnya suatu proses respirasi dapat diketahui dari kenaikan temperatur yang diakibatkannya, pula dapat diukur dengan banyak sedikitnya volume O_2 yang dipergunakan atau banyaknya volume CO_2 yang dipergunakan atau banyaknya volume CO_2 yang terlepas dalam 24 jam per gram berat kering.

Nama Tanaman	Bagian	Suhu	Kegiatan	Respirasi
Gandum (<i>Triticum sativum</i>)	Akar Muda	15°–18°C	O_2	yang terambil 67,9 ml.
Padi (<i>Oryza sativa</i>)	Akar Muda	20°–21°C	O_2	yang terambil 44,4 ml.
Selada (<i>Lactuca sativa</i>)	Biji Tumbuh	16°C	CO_2	yang terlepas 82,5 ml.
Jamur Miselium (<i>Aspergillus niger</i>)	-	CO_2		yang terlepas 1.800 ml.

Daftar diatas ini dipetik dari Kostychev, Plant Respiration, C.J. Lyon, ad. P. Blakieton's Son and Co Philadelphia, 1927, p.5.

Metabolisme dari Respirasi Aerob

Proses utama respirasi adalah mobilitas senyawa organik dan oksidasi senyawa-senyawa tersebut secara terkendali untuk membebaskan energi bagi pemeliharaan dan perkembangan tumbuhan. Mula-mula akan kita perhatikan reaksi keseluruhan dari oksidasi satu molekul heksosa berikut ini :

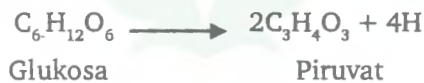


Reaksi respirasi (disebut juga reaksi biologis) suatu karbohidrat, misalnya glukosa berlangsung dalam 4 tahapan yaitu :

i. Glikolisis

Merupakan serangkaian reaksi yang menguraikan satu molekul glukosa menjadi dua molekul asam piruvat. Jalur reaksi ini disebut juga jalur Embden-Meyerhoff_Parnas (EMP) (dinamakan menurut tiga peneliti utama) jalur ini juga merupakan dasar dari respirasi anaerobic atau fermentasi.

Persamaan reaksi keseluruhan glikolisis dapat dituliskan sebagai berikut:



Dari persamaan terlihat bahwa satu molekul glukosa diubah menjadi dua molekul asam piruvat. Namun, glikolisis bukan merupakan reaksi satu tahap, tetapi adalah serangkaian reaksi yang erat kaitannya yang mengarah ke pembentukan piruvat. Reaksi glikolisis berlangsung dalam sitoplasma dan tidak memerlukan adanya oksigen. Glikolisis dapat dibagi dalam dua fase utama yaitu fase persiapan dan fase oksidasi. Pada fase persiapan, glukosa diubah menjadi dua senyawa tiga karbon dan pada fase oksidasi kedua senyawa tiga karbon itu selanjutnya diubah menjadi asam piruvat, pada gambar 3-1.1.

Lima reaksi terjadi pada fase persiapan. Pertama glukosa diposforilase oleh ATP dan enzim heksokinase membentuk glukosa-6-fosfat dan ADP. Reaksi berikutnya melibatkan perubahan gula aldosa menjadi gula ketosa. Reaksi ini dikatalis oleh enzim fosfoglukoisomerase dan menyebabkan perubahan glukosa-6-fosfat menjadi fruktosa-6-fosfat kemudian difosforilasi dengan adanya ATP dan enzim fosfofruktokinase menghasilkan fruktosa-1,6-difosfat dan ADP. Selanjutnya fruktosa-1,6-difosfat dipecah menjadi dua molekul senyawa tiga karbon yaitu 3-fosfogliseraldehida (gliseraldehida-3-fosfat)

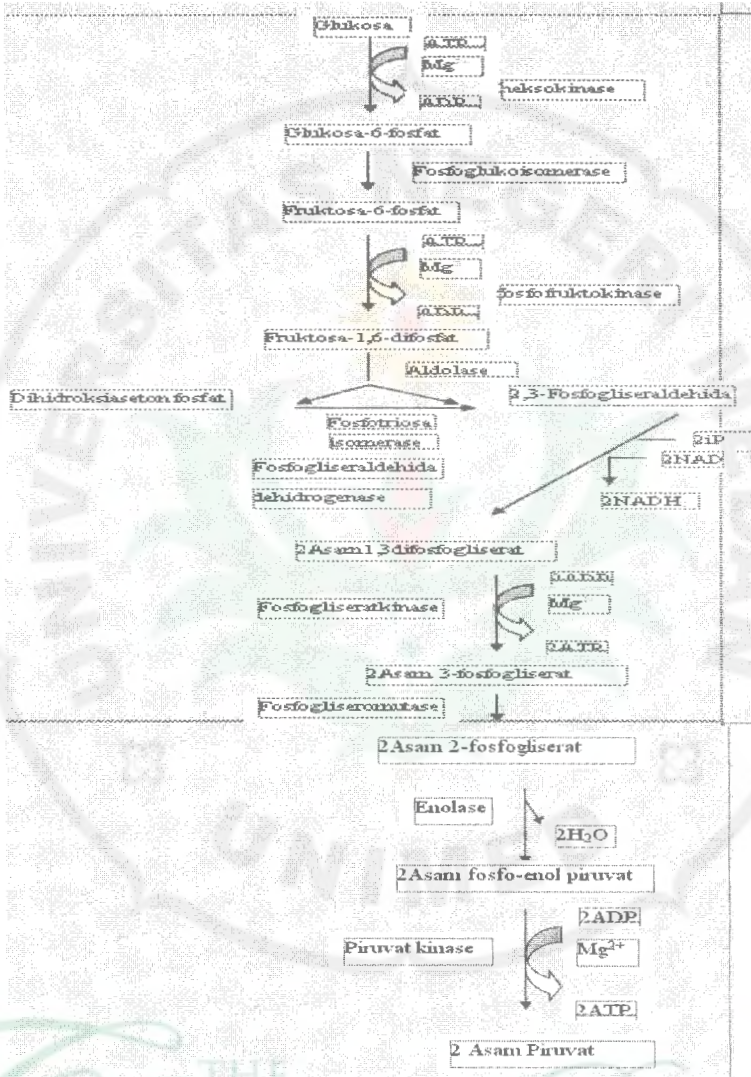
dan dihidroksiasetonfosfat, dengan bantuan enzim aldolase. Antara kedua senyawa tiga karbon itu terdapat suatu kesetimbangan, dikatalisis oleh enzim fosfotriosa isomerase. 3-fosfogliseraldehida diubah menjadi 1,3-difosfoglisarat. Reaksi ini melibatkan penambahan fosfat anorganik pada karbon pertama 3-fosfogliseraldehida dan reduksi NAD (NAD; Nikotinamida Adenin Dinukleotida) menjadi NADH₂ (NADH + H⁺; nikotinamida adenin dinukleotida tereduksi). Reaksi ini dikatalis oleh fosfogliseraldehida dehidrogenase.

Perubahan 3-fosfogliseraldehida yang bersinambungan menjadi senyawa-senyawa antara lain jalur glikolisis yang menyebabkan pergeseran dalam kesetimbangan antara 3-fosfogliseraldehida dan dehidroksiaseton-fosfat. Jadi dengan bersinambungnya perubahan menjadi senyawa antara lain glikolisis bertambah banyak dehidroksiaseton-fosfat yang diubah menjadi 3-fosfogliseraldehida.

Penambahan fosfat anorganik dalam oksidasi 3-fosfogliseraldehida itu penting, karena fosfat itu terlibat dalam sintesis ATP dalam reaksi berikutnya. Dengan adanya ADP dan enzim fosfogli serat kinase, asam 1,3-difosfoglisarat diubah menjadi asam 3-fosfogli serat dan ATP dibentuk. Asam 3-fosfoglisarat kemudian diubah menjadi asam 2-fosfoglisarat oleh enzim enolase membentuk asam fosfoenol piruvat. Dengan adanya ADP dan piruvat kinase, asam fosfoenol piruvat diubah menjadi piruvat. Dalam reaksi ini gugus fosfat dari asam fosfoenol piruvat dipindahkan ke ADP membentuk ATP. Dengan demikian berakhir glikolisis. Proses glikolisis berperan mensuplai energi dan senyawa-senyawa antara tertentu yang dapat digunakan untuk sintesis.

Jumlah ATP yang dihasilkan pada glikolisis adalah :

Pada fase persiapan 2ATP digunakan untuk setiap molekul glukosa yang diubah menjadi 2 molekul senyawa tiga karbon. Tetapi dalam fase oksidasi, 4ATP dibentuk. Jika diperhatikan seluruh jalur glikolisis, perubahan satu molekul glukosa menjadi dua molekul asam piruvat (tanpa oksigen) menghasilkan keuntungan bersih dua molekul ATP.



Glikolisis, perubahan glukosa menjadi asam piruvat.

ii. Dekarboksilasi Oksidatif Piruvat.

Asam piruvat yaitu suatu senyawa 3C diubah menjadi senyawa 2C (Asetil – koA) dengan melepaskan CO₂. Telah kita lihat bahwa penguraian karbohidrat pada kondisi anaerob berlangsung melalui glikolisis dan dihasilkan asam piruvat. Tetapi, jika tersedia cukup oksigen terjadi dekarboksilasi oksidatif dari asam piruvat membentuk asetil- KoA. Reaksi ini sangat kompleks dan memerlukan beberapa kofaktor dari suatu kompleks enzim. Kofaktor yang

diperlukan untuk keberhasilan pembentukan asetil-SKoA adalah tiamin pirofosfat (TPP), NAD, koenzim A (KoA-SH) dan asam lipoat. Pembentukan asetil-SKoA dari asam piruvat berlangsung dalam 4 langkah reaksi.

- 1) Pembentukan suatu kompleks antara TPP dan piruvat diikuti dengan dekarboksilasi asam piruvat.
- 2) Unit asetil dehidra yang tertinggal setelah dekarboksilasi, bereaksi dengan asam lipoat membentuk kompleks asetil asam lipoat. Dalam reaksi ini asam lipoat tereduksi dan aldehid dioksidasi menjadi asam. Asam yang baru terbentuk itu membentuk suatu tioester dengan asam lipoat.
- 3) Pelepasan gugus asetil dari asam lipoat ke koenzim A-SH, hasil reaksinya adalah asetil KoA dan asam lipoat tereduksi.
- 4) Regenerasi asam lipoat teroksidasi dengan memindahkan elektron dari asam lipoat tereduksi ke NAD. Reaksi terakhir ini penting agar suplai asam lipoat teroksidasi secara bersinambungan selalu tersedia untuk pembentukan asetil S-KoA dari asam piruvat. Selain itu, dua elektron yang dipindahkan ke NAD membentuk NADH_2 akan diteruskan ke rantai respiratoris (sistem angkutan elektron) akan menghasilkan tiga molekul ATP.

Dekarboksilasi oksidatif asam piruvat menjadi asetil-SKoA ini berlangsung dalam mitokondria.

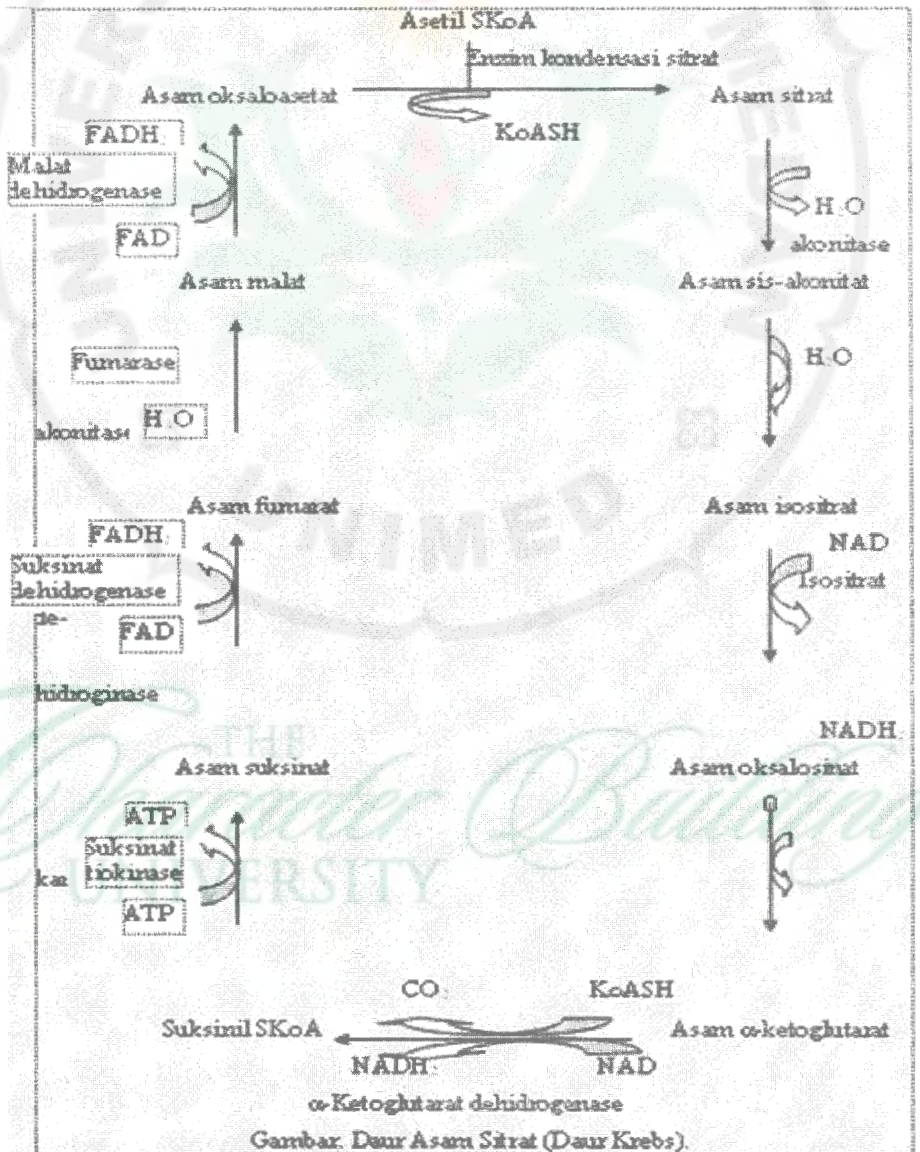
Tiamin pirofosfat + asam piruvat	→	kompleks TPP + CO_2 (TPP)
Kompleks TPP + asam lipoat	→	kompleks asetil - asam lipoat
Kompleks asetil asam lipoat + KoASH	→	asetil SKoA + asam lipoat
Asam lipoat + NAD	→	asam lipoat + NADH_2

Gambar : Dekarboksilasi oksidatif asam piruvat membentuk asetil koenzim A

iii. Daur Sitrat

Senyawa 2C yang dihasilkan pada tahap dekarboksilasi oksidatif piruvat diuraikan menjadi CO_2 , daur ini dinamakan daur asam sitrat karena senyawa C_6 yang pertama kali dibentuk dalam daur ini adalah asam sitrat. Daur ini juga dikenal dengan nama daur krebs, menurut Sir Hans Krebs yang bersama-sama ilmuwan-ilmuwan lain menguraikan jalur ini. Nama lain daur ini ialah daur asam trikarboksilat karena dalam daur ini ikut serta asam-asam dengan tiga gugus karboksil.

Glikolisis dan fermentase adalah merupakan proses yang tidak relatif dalam melepaskan energi. Tetapi, pada keadaan aerob asam piruvat hasil akhir glikolisis dapat mengalami dekarboksilasi oksidatif dengan KoAH membentuk asetil KoA. Asetil KoA merupakan rantai penghubung antara glikolisis dan siklus Krebs. Melalui asosiasi sistem pengangkutan elektron oksidasi dari siklus Krebs dapat menghasilkan 24 ATP. Reaksi siklus Krebs dan sistem pengangkutan elektron memerlukan oksigen dan berlangsung dalam mitokondria.



a. Pembentukan Asam Sitrat

Reaksi pertama siklus Krebs adalah kondensasi asetil SKoA dengan asam oksaloasetat membentuk asam sitrat dan membebaskan koenzim A dengan bantuan enzim kondensasi.

b. Regenerasi Asam Oksaloasetat

Reaksi yang melibatkan 4 oksidasi dan 3 molekul H_2O (satu molekul digunakan dalam reaksi kondensasi) asam oksaloasetat diregenerasi dari asam sitrat. Dalam proses tersebut dihasilkan 2 molekul CO_2 dan 8 molekul H.

Perubahan dapat balik 3 asam pertama dari siklus Krebs yaitu asam sitrat, dan asam isositrat, dikatalisis oleh enzim yang sama yaitu akotinas. Reaksi pertama adalah hidrasi asam sitrat membentuk asam sisakonit. Reaksi kedua adalah dehidrasi asam sisakonit menghasilkan isositrat.

Reaksi selanjutnya adalah asam isositrat diubah menjadi asam oksalosinat dengan bantuan asam isositrat dehidrogenase dan NAD. Reaksi siklus Krebs selanjutnya adalah dekarboksilase asam oksalosuksinat membentuk asam á-ketoglutarat dikatalisis enzim karboksilase.

Oksidasi asam á-ketoglutarat dengan oksidase asam piruvat. Untuk dekarboksilasi diperlukan tiamin pirofosfat dan dibentuk suksinat sumialdehida yang membentuk kompleks dengan asam lipoat. Gugus suksinil dari kompleks dengan asam lipoat teroksidasi. Gugus suksinil dari kompleks ini dipindahkan ke KoASH, membentuk suksinil SKoA dan asam lipoat tereduksi. Asam lipoat tereduksi dioksidasi oleh enzim yang mengandung NAD sehingga NAD direduksi dalam proses tersebut. Kompleks enzim yang mengkatalisis reaksi secara kolektif disebut á-ketoglutarat dehidrogenase. Reaksi terakhir adalah oksidasi kedua siklus krebs. Suksinil SKoA diubah oleh suksinat tiokinase menjadi asam suksinat dan KoASH. Pada reaksi tiokinase energi yang tersimpan dalam tioester dari suksinil-SKoA digunakan untuk mengubah $ADP + P_i$ menjadi ATP.

Oksidase asam suksinat membentuk asam fumarat tidak menggunakan nukleotida piridin. Sebaliknya, asam suksinat didehidrogenasi oleh feriflovo-protein suksinat dehidrogenase. Dua elektron dan dua ion hidrogen diambil dari asam suksinat dan digunakan untuk mereduksi FAD dari enzim suksinat dehidrogenase. Oksidasi asam suksinat merupakan oksidasi ketiga daur krebs. Hasil reaksi ini adalah asam fumarat, kemudian mengalami hidrasi menjadi asam malat oleh enzim fumarase.

Pada oksidasi keempat siklus krebs asam malat diubah menjadi asam oksaloasetat oleh malat dehidrogenase. Dalam proses ini NAD direduksi menjadi NADH_2 . Jadi degenerase asam oksaloasetat melengkapi siklus. Dalam keempat oksidasi, empat pasang ion H^+ dan empat pasang elektron diambil dari senyawa antara siklus. Tiga dari pasangan ion H^+ dan elektron digunakan untuk mereduksi piridin nukleotida dan sepasang ion H^+ dan elektron digunakan untuk mereduksi gugus prostetik FAD dari suksinat dehidrogenase.

iv. Oksidasi Terminal dalam Rantai Respiratoris.

Hydrogen yang dihasilkan oleh substrat pada tahap (i) hingga (iii) akhirnya berkombinasi dengan air. Agar hal ini dapat berlangsung, terjadi suatu angkutan elektron sepanjang suatu rantai sistem redoks, yaitu suatu sistem angkutan atau transpor elektron. Energi yang dibebaskan oleh angkutan elektron ini digunakan untuk pembentukan ATP.

Untuk organisme aerob, enzim–enzim daur krebs perlu berasosiasi dengan enzim sistem angkutan elektron (rantai respiratoris). Melalui asosiasi inilah NAD/NADP dan FAD yang tereduksi dalam daur krebs dioksidasi lagi kembali. Energi yang dilepaskan dalam oksidasi ini digunakan untuk sintesis ATP. Senyawa yang akan dioksidasi (substrat), AH_2 , mula–mula bereaksi dengan piridin nukleotida, biasanya NAD tetapi kadang–kadang NADP. Dapat berlaku sebagai substrat (AH_2) yaitu 3–fosfogliseraldehida, asam piruvat, asam a–ketoglutarat, asam suksinat dan asam malat.

Dua elektron dan dua ion H^+ dipindahkan ke NAD, sehingga direduksi menjadi NADH_2 . NADH_2 memindahkan dua elektron dan dua ion H^+ ke suatu enzim flavin, flavin mononukleotida (FMN) atau flavin adenin dinukleotida (FAD), sehingga mereduksi senyawa tersebut. Energi yang diperlukan untuk mereduksi FAD kurang dari yang dilepaskan oleh NADH_2 dan energi sisanya digunakan untuk sintesis satu molekul ATP dan ADP dan iP. Selanjutnya FADH_2 mereduksi suatu enzim yang karakteristiknya belum diketahui, tetapi mengandung satu besi bukan-hem yang terkait dengan gugus SH. Senyawa ini mereduksi dua molekul enzim porfirin-besi pemindahan elektron yaitu sitokrom b.

Reduksi dan oksidasi sitokrom dilaksanakan dengan menambah dan mengambil satu elektron pada bagian besi molekul, sehingga mengubah besi dari bervalensi +2 ke +3 dan sebaliknya. Sitokrom b, mereduksi senyawa fenolik menjadi kinon dan ubikinon; pada titik ini perlu ditambahkan ion H^+ dan elektron. Ion H^+ yang ditambahkan tidak perlu sama dengan ion H^+ yang meninggalkan sistem pada oksidasi FADH_2 , karena sistem berair

dan sejumlah H^+ selalu terdapat. Elektron dari ubikinon kemudian mereduksi sitokrom c, dua ion hidrogen meninggalkan sistem angkutan.

Pada titik ini dibebaskan cukup energi yang digunakan untuk sintesis molekul ATP ke dua untuk setiap dua elektron yang dipindahkan. Sitokrom c, mereduksi sitokrom a yang selanjutnya mereduksi sitokrom a_3 dan pada titik ini dibentuk ATP ke tiga untuk setiap dua elektron yang dipindahkan.

Sitokrom a_3 merupakan anggota sistem angkutan elektron yang dapat bereaksi dengan molekul oksigen. Sitokrom a dan a_3 membentuk suatu asosiasi molekul yang disebut sitokrom oksidase yang secara kimia belum dapat dipisahkan. Dua elektron dipindahkan ke satu atom oksigen ($1/2 O_2$). Ini menyempurnakan pemindahan dua elektron dari tingkat energi tinggi yang dimiliki substrat (AH_2) ke tingkat energi rendah yang terdapat dalam air. Energi yang dilepaskan oleh oksidasi substrat (bahan bakar) disimpan dalam tiga molekul ATP yang disintesis disepanjang proses angkutan elektron.

Tiga ATP dibentuk untuk setiap $NADH_2$ masuk ke sistem angkutan elektron dan 2 ATP untuk tiap $FADH_2$. ini dapat dimengerti karena $FADH_2$ masuk ke sistem angkutan setelah $NADH_2$.

Pembentukan ATP dalam sistem angkutan elektron (rantai respiratoris) dikenal juga sebagai fosforilasi oksidatif biologis. Telah dinyatakan sebelumnya bahwa proses keseluruhan oksidasi biologis mempunyai dua fungsi yaitu menghasilkan energi dan menyediakan senyawa antara untuk sintesis. Jika dihitung jumlah ATP yang dihasilkan oksidasi biologis itu, dengan bahan awal oksidasi adalah satu molekul glukosa, maka diperoleh 38 molekul ATP.

Enzim – Enzim Yang Aktif Dalam Respirasi

Enzim-enzim respirasi dapat kita bagi atas golongan-golongan seperti transpoforilase, desmolase, karboksilase, hidrase, dehidrogenase, oksidase, peroksidase, katalase.

➤ Transpoforilase

Enzim ini kegitannya berupa memberi H_3PO_4 dari molekul yang satu ke molekul yang lain. Dalam pemberian pospat tersebut beberapa transpoforilase membutuhkan bantuan ion-ion Mg^{2+}

➤ Desmolase

Enzim ini membantu dalam pemindahan atau penggabungan ikatan-ikatan karbon seperti aldolase dalam pemecahan fruktosa menjadi gliseraldehida dan dihidroksiaseton.

➤ **Karboksilase**

Enzim ini dapat membantu perubahan asam organik secara bolak-balik. Perubahan asam piruvat menjadi asetaldehida dengan bantuan karboksilase piruvat. Perubahan asam oksalosuksinat menjadi asam α -ketoglutarat, berlangsung karena bantuan karboksilase dan ion-ion Mn^{2+} .

➤ **Hidrase**

Enzim ini berupa penambahan dan pengurangan air dari suatu senyawa tanpa menyebabkan perubahan terurainya senyawa tersebut. Enolase, fumarase, akonitase adalah enzim-enzim yang termasuk dalam golongan hidrase.

➤ **Dehidrogenase**

Enzim ini berupa pemindahan hidrogen dari zat yang satu ke zat yang lain. Dehidrogenase dapat menjalankan dua fungsi sekaligus yaitu mengambil hidrogen dari zat yang satu serta menambahkan zat tersebut ke zat yang lain. Zat yang memberikan hidrogen disebut donor sedangkan yang menerima disebut acceptor.

➤ **Oksidase**

Enzim oksidase berupa suatu protein yang mengandung besi atau tembaga. Tirosinase dan oksidase asam askorbin mengandung tembaga sebagai koenzim sedangkan oksidase sitokrom dapat berupa besi atau tembaga. Fungsi oksidase adalah mempergiat penggabungan O_2 dengan suatu substrat, sedangkan pada saat itu mereduksi O_2 sehingga terjadi H_2O .

➤ **Peroksidase**

Enzim ini mempunyai besi sebagai gugus prostetikanya. Fungsi enzim ini adalah membantu mengoksidasikan senyawa-senyawa fenolat. Oksigen yang digunakan diambil dari H_2O_2 .

➤ **Katalase**

Enzim ini terdapat pada sel-sel tanaman maupun hewan. Katalase mempunyai gugus prostetik berupa besi. Enzim ini dapat dipereleh dalam bentuk hablur. Fungsi katalase adalah membantu pengubahan hidrogen-per-oksida menjadi air dan oksigen. Reaksinya adalah sebagai berikut:



Molekul-molekul H_2O_2 selalu terdapat dalam jumlah yang besar dalam berbagai jaringan. Akan tetapi, jika molekul tersebut dalam keadaan banyak dapat menyebabkan keracunan pada jaringan.

Tugas

- 1) Tuliskan pengertian respirasi
- 2) Mengapa energi yang diperoleh dari respirasi aerob lebih besar dari respirasi an aerob, jelaskan secara ringkas
- 3) Buatlah skema reaksi pada tahap glikolisis

GLOSARIUM

Asam Piruvat:

Suatu senyawa 3C diubah menjadi senyawa 2C (Asetil – koA) dengan melepaskan CO_2 .

Daur Sitrat:

Senyawa 2C yang dihasilkan pada tahap dekarboksilasi oksidatif piruvat diuraikan menjadi CO_2 .

Glikolisis:

Merupakan serangkaian reaksi yang menguraikan satu molekul glukosa menjadi dua molekul asam piruvat.

Respirasi Anaerob:

Respirasi yang prosesnya tidak menggunakan O_2 yang tersedia di dalam udara itu. Respirasi anaerob juga lazim disebut fermentasi

Karboksilase:

Enzim yang membantu perubahan asam organik secara bolak-balik dengan bantuan enzim karboksilase piruvat.

Desmolase:

Enzim yang membantu pemindahan atau penggabungan ikatan-ikatan karbon.