

SUMBER BELAJAR PENUNJANG PLPG 2016

MATA PELAJARAN/PAKET KEAHLIAN

BIOLOGI

BAB XIII

METABOLISME



Dra. Ely Rudyatmi, M.Si

Dra. Endah Peniati, M.Si

Dr. Ning Setiati, M.S

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
DIREKTORAT JENDERAL GURU DAN TENAGA KEPENDIDIKAN
2016**

BAB XIII

METABOLISME

Kompetensi Inti Guru (KI)

Menguasai materi, struktur, konsep, dan pola pikir keilmuan yang mendukung mata pelajaran yang diampu

Kompetensi Guru Mata pelajaran (KD)

Memahami lingkup dan kedalaman biologi sekolah

Indikator Pencapaian Kompetensi

Menganalisis proses anabolisme disertai aplikasinya

Menganalisis proses katabolisme disertai aplikasinya

Menganalisis hubungan metabolisme karbohidrat, lemak dan protein

Membedakan antara proses anabolisme dan katabolisme

Menganalisis pengaruh faktor fisik terhadap fotosintesis

A. Metabolisme

Metabolisme merupakan serangkaian reaksi kimia, terjadi secara bertahap di dalam sel/organisme yang memungkinkan adanya kehidupan. Dalam prosesnya terjadi perubahan senyawa organik baik dipecah untuk dikeluarkan energinya maupun diubah untuk disimpan atau untuk membangun struktur sel. Pada organisme tertentu (tumbuhan hijau) dapat membangun zat organik dari zat anorganik dan air yang ada di lingkungan dengan bantuan cahaya.

Jalur metabolisme yang membebaskan energi dengan cara memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana dikenal dengan proses katabolisme. Jalur metabolisme yang menggunakan energi untuk membentuk/membangun senyawa organik kompleks dari senyawa sederhana atau senyawa anorganik dikenal dengan proses anabolisme. Senyawa kompleks yang dipecah maupun dibangun oleh organisme yang perannya sebagai sumber energi adalah karbohidrat, lemak dan protein.

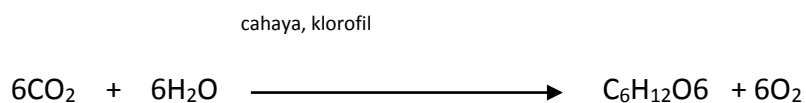
Pada manusia, karbohidrat, lemak dan protein yang terkandung dalam makanan setelah dicerna secara mekanik dan kimiawi menjadi bentuk halus dan sederhana yang dapat diserap oleh tubuh. Setelah diserap oleh sel epitel usus halus hasil pencernaan akan masuk ke dalam sistem peredaran darah, dibawa ke berbagai jaringan yang akhirnya akan diserap oleh sel dan dioksidasi untuk menghasilkan energi atau disimpan sebagai cadangan energi dalam tubuh.

Di dalam tubuh proses pemecahan karbohidrat, lemak dan protein berlangsung serempak, artinya baik proses pemecahan (katabolisme) maupun pembentukan (anabolisme) menjadi senyawa lain berjalan bersama-sama. Kedua proses ini saling melengkapi dan saling berhubungan satu dengan yang lainnya. Tumbuhan hijau tidak memerlukan makanan, hal ini dikarenakan tumbuhan hijau dapat membuat makanannya sendiri (karbohidrat) melalui proses anabolisme dan hasilnya dipecah atau dikatabolisme untuk menghasilkan energi atau disimpan sebagai cadangan makanan.

B. Anabolisme

Padi yang ditanam di tempat yang terkena matahari bijinya padat berisi, tetapi yang di tanam di tempat yang terlindung bijinya rapuh dan tidak padat berisi. Mengapa terjadi perbedaan hasil penanaman padi di tempat yang berbeda ?

Salah satu ciri hidup yang hanya dimiliki oleh tumbuhan hijau adalah kemampuan-nya dalam menggunakan karbon dari udara untuk diubah menjadi senyawa organik (karbohidrat) serta diasimilasi dalam tubuh tumbuhan. Proses perubahan karbon menjadi senyawa organik memerlukan energi cahaya, maka anabolisme karbohidrat pada tumbuhan hijau disebut juga dengan fotosintesis. Fotosintesis adalah proses perubahan zat anorganik H_2O dan CO_2 oleh klorofil menjadi senyawa organik (karbohidrat) dengan bantuan energi cahaya, dinyatakan dengan persamaan reaksi kimia sebagai berikut :



Hasil fotosintesis disimpan sebagai cadangan makanan dalam bentuk amilum. Padi merupakan salah satu jenis tumbuhan hijau yang menyimpan cadangan makanan dalam bentuk amilum di dalam biji. Pembentukan amilum memerlukan cahaya, tanpa cahaya yang cukup produksi amilum tidak maksimal. Bagaimana cahaya berperan dalam pembentukan amilum dapat dijelaskan sebagai berikut. Proses fotosintesis terjadi di dalam kloroplast berlangsung melalui 2 tahap reaksi yaitu: (1) reaksi terang (reaksi yang memerlukan cahaya), mengubah energi cahaya menjadi energi kimia; dan (2) reaksi gelap (reaksi yang tidak memerlukan cahaya), mensintesis gula dari CO_2 menggunakan energi yang dihasilkan dari reaksi terang.

Pada reaksi terang ini terdapat 2 bagian proses yaitu (1) Fotosistem I, yang menyangkut penyerapan energi matahari pada panjang gelombang sekitar 700 nm, tidak melibatkan proses pelepasan oksigen; (2) Fotosistem II, menyangkut proses penyerapan energi matahari pada panjang gelombang 680 nm, melibatkan proses pembentukan oksigen dan air (H_2O).

Fotosistem I merupakan satu partikel yang disusun sekitar 200 molekul klorofil-a, 50 molekul klorofil -b, 50 sampai 200 molekul pigmen karotenoid, dan satu molekul penerima energi matahari yang disebut P700. Energi matahari (foton) yang ditangkap oleh pigmen pelengkap, dipindahkan melalui beberapa molekul pigmen, disebut proses pemindahan eksiton, yang akhirnya diterima oleh P700. P700 melepaskan elektron yang mempunyai energi tinggi. Proses penangkapan foton dan pemindahan eksiton di dalam fotosistem ini berlangsung dengan sangat cepat dan dipengaruhi oleh suhu. Dengan mekanisme yang sama, proses penangkapan foton dan pemindahan eksiton terjadi pula pada fotosistem II, yaitu pada panjang gelombang 680. Partikel fotosistem I dan II terdapat di dalam membran kantong tilakoid secara terpisah.

Fotosistem I dan II merupakan komponen penyalur energi dalam rantai pengangkutan elektron fotosintesis secara kontinu, dari molekul air sebagai donor elektron ke NADP^+ sebagai akseptor elektron. Pengangkutan elektron dalam fotosintesis terdiri dari 3 bagian yaitu: (1) bagian pendek, dari H_2O ke fotosistem II; (2) bagian dari fotosistem II ke Fotosistem I yang dirangkaikan dengan reaksi pembentukan ATP dari $\text{ADP} + \text{P}_i$; dan (3) bagian dari fotosistem I ke NADP^+ yang menghasilkan NADPH . Penyerapan

foton oleh molekul pigmen fotosistem I menyebabkan tereksitasinya molekul tersebut, menghasilkan eksiton berenergi tinggi yang kemudian ditangkap oleh molekul P700. Akibatnya P700 melepaskan electron dan memindahkannya ke molekul penerima elektron pertama, yaitu P430. Selanjutnya elektron dialirkan melalui deretan molekul pembawa elektron sampai ke NADP^+ menjadi NADPH. Dalam proses ini diperlukan dua elektron untuk mereduksi satu molekul NAD^+ . Lepasnya satu elektron dari P700 mengakibatkan berubahnya molekul ini menjadi bentuk teroksidasinya P700^+ , yang kekurangan satu elektron. Untuk mengisi kekurangan elektron pada P700 ini, satu elektron dialirkan melalui sederetan molekul pembawa elektron, dari molekul P680 dalam fotosistem II. Dalam hal ini pengaliran elektron hanya terjadi setelah terlebih dahulu terjadi penyinaran terhadap fotosistem II, yaitu tereksitasinya P680 yang segera melepaskan elektron ke penerima elektron pertamanya, yaitu C550. Ini mengakibatkan teroksidasinya bentuk P680 menjadi P680^+ . Kekurangan electron pada P680^+ dipenuhi dari reaksi oksidasi molekul H_2O menjadi O_2 . Proses pengangkutan elektron dari H_2O ke NADP^+ yang didorong oleh energi matahari ini disebut pengangkutan tidak mendaur dalam elektron fotosintetik. Dalam hal ini satu molekul H_2O melepaskan dua elektron yang diperlukan untuk mereduksi satu molekul NADP^+ menjadi NADPH, dirangkaikan dengan pembentukan ATP dari ADP dan P_i , disebut proses fotofosforilasi atau fosforilasi dalam fotosintesis.

Proses pengangkutan elektron dalam fotosintesis dari H_2O ke NADP^+ . Pada proses ini digunakan energi matahari yang ditangkap oleh molekul P700 dari Fotosistem I dan molekul P680 dari Fotosistem II. Elektron yang sudah tereksitasi di fotosistem II selanjutnya dialirkan ke fotosistem I melalui molekul penerima elektron; sitokrom 559 (sitokrom $b_3 = \text{cyt. } b_3$), plastoquinon (PQ), sitokrom 553 (sitokrom $f = \text{cyt. } f$), plastosianin (PC), dan molekul P700 di fotosistem. Pengangkutan elektron dari PQ ke $\text{cyt. } f$ dirangkaikan dengan pembentukan ATP dari $\text{ADP} + \text{P}_i$. Sementara itu elektron yang telah tereksitasi di fotosistem I, dialirkan berturut-turut ke molekul substrat feredoksin (FP), dan akhirnya ke NADP^+ , dimana molekul ini tereduksi NADPH. Dalam keadaan tertentu, elektron yang tereksitasi di fotosistem I tidak dialirkan ke NADP^+ , tetapi kembali ke P700 melalui molekul penerima elektron lainnya, sitokrom 564 (sitokrom $b_6 = \text{cyt. } b_6$), yang

selanjutnya melalui $\text{cyt. } b_3$ dialirkan ke P700 di fotosistem I. Mekanisme pengangkutan electron ini disebut pengangkutan electron mendaur dalam fotosintesis (fotofosforilasi siklik). Sedangkan pengangkutan elektron dari H_2O ke NADP^+ melalui fotosistem I dan fotosistem II, disebut pengangkutan elektron tak mendaur dalam fotosintesis (fotofosforilasi non siklik).

Pada tahap reaksi gelap, energi kimia yang dihasilkan dari reaksi terang (NADPH dan ATP) digunakan dalam reaksi ini untuk sintesis glukosa dari CO_2 , untuk selanjutnya digunakan dalam reaksi pembentukan pati, selulosa dan polisakarida lainnya sebagai hasil akhir fotosintesis dalam tumbuhan.

Jalur metabolisme tahap pembentukan glukosa dari CO_2 ini merupakan jalur metabolisme mendaur yang pertama kali diusulkan oleh M. Calvin, sehingga disebut daur Calvin. Pada prinsipnya daur Calvin merupakan tahapan reaksi pembentukan karbohidrat, dengan memanfaatkan energi hasil reaksi terang yaitu NADPH dan ATP. Pada daur Calvin reaksi yang pertama kali terjadi adalah reaksi antara karbondioksida yang difiksasi atau diikat dari udara atau atmosfer. Pada reaksi ini hasilnya adalah glukosa yang bila tidak segera digunakan akan disimpan oleh sel sebagai cadangan karbohidrat yaitu amylum atau zat tepung. Ada juga sebagian yang lain digunakan untuk membentuk polisakarida penyusun sel yaitu sellulosa. Juga digunakan untuk membentuk sukrosa dan zat kimia yang lain yang sangat dibutuhkan oleh tanaman.

Reaksi pertama dari daur (siklus) Calvin terjadi reaksi antara 6 molekul CO_2 dari udara bereaksi dengan 6 molekul ribulosa 1,5-difosfat, dikatalisis oleh enzim ribulosa difosfat karboksilase (disebut juga ribulosa difosfat karboksidismutase), menghasilkan 12 molekul 3-fosfogliserat, melalui pembentukan senyawa antara 2-karboksi 3-ketoribitol 1,5-difosfat.

Tahap reaksi kedua, 12 molekul 3-fosfogliserat diubah menjadi 12 molekul gliseraldehida 3-fosfat melalui pembentukan 1,3-difosfogliserat, dikatalisis oleh enzim fosfogliserat kinase dan gliseraldehidafosfat dehidrogenase, menggunakan 12 ATP dan 12 NADPH.

Tahap ketiga dari daur Calvin terjadi reaksi antara 12 gliseraldehida 3-fosfat diubah menjadi 3 molekul fruktosa 6-fosfat melalui pembentukan senyawa dihidroksi aseton fosfat dan fruktosa 1,6-difosfat. Satu dari 3 molekul fruktosa 6-fosfat yang

terbentuk diubah menjadi glukosa sebagai hasil akhir, melalui pembentukan glukosa 6-fosfat, dikatalisa oleh enzim glukosafosfat isomerase dan glukosa 6-fosfatase.

C. Katabolisme

Bekerja membersihkan pekarangan rumah di pagi hari tidak terasa berat, tetapi lama kelamaan tubuh terasa lemas. Setelah istirahat baru ingat kalau belum makan pagi, maka setelah membersihkan badan segera makan pagi. Setelah makan pagi tubuh menjadi bertenaga kembali untuk bekerja, mengapa bisa terjadi hal-hal tersebut ?

Hal ini dikarenakan setelah makan nasi yang banyak mengandung karbohidrat, glukosa hasil pencernaan nasi akan diedarkan ke seluruh tubuh. Di dalam sel, glukosa akan mengalami pemecahan (katabolisme) untuk dimanfaatkan energinya atau mengalami perubahan untuk disimpan dalam bentuk glikogen atau lemak sebagai cadangan energi. Proses pemecahan glukosa yang terjadi di dalam sel hidup dikenal dengan istilah respirasi sel. Respirasi sel menyangkut proses enzimatik di dalam sel, tidak hanya molekul glukosa (karbohidrat), tetapi juga lemak (asam lemak dan gliserol) dan protein (asam amino) diuraikan menjadi karbondioksida, air dan urea (amonia / asam urat) dengan konversi energi biologis yang sangat bermanfaat. Hasil konversi energi biologis inilah yang mengakibatkan tubuh menjadi bertenaga kembali setelah makan.

Bagaimana setelah makan makanan yang banyak mengandung karbohidrat tubuh terasa bertenaga kembali dapat dijelaskan sebagai berikut. Glukosa di dalam sel akan dioksidasi sempurna menjadi 6CO_2 dan $6\text{H}_2\text{O}$ dan dihasilkan 36 /38 ATP. Oksidasi atau pembakaran tersebut memerlukan oksigen bebas, sehingga reaksi keseluruhannya adalah sebagai berikut :



Pengubahan glukosa menjadi CO_2 dan H_2O dan dihasilkan 36 / 38 ATP, terjadi melalui 4 tahap yaitu: (1) glikolisis; (2) dekarboksilasi oksidatif asam piruvat; (3) siklus Krebs; dan (4) transport elektron.

Tahap 1. Glikolisis

Glikolisis disebut juga reaksi Embden Meyerhoff atau Embden Meyerhoff Parnas, merupakan rangkaian reaksi pengubahan 1 molekul glukosa menjadi 2 molekul asam piruvat, menghasilkan 2 NADH dan 2 ATP. Prosesnya adalah sebagai berikut:

Glikolisis terjadi di dalam sitoplasma, dalam mekanisme reaksinya terdiri atas 10 tahap reaksi. Secara rinci 10 reaksi tersebut adalah sebagai berikut:

1) Phosphorilasi glukosa menjadi glukosa 6 – fosfat.

Langkah pertama glikolisis ini memerlukan energi dalam bentuk 1 molekul ATP dari suplai tubuh. Reaksinya dikatalisis oleh enzim heksokinase yang memerlukan ion Mg^{2+} sebagai kofaktor. Penambahan satu molekul fosfat oleh ATP terhadap glukosa menghasilkan glukosa -6 fosfat, dan ATP berubah menjadi ADP.

2) Pengubahan glukosa 6-fosfat menjadi fruktosa 6-fosfat

Reaksi tahap ke-dua ini merupakan reaksi isomerisasi glukosa 6-fosfat menjadi fruktosa 6-phosphate, dikatalisis oleh enzim phosphohexoisomerase yang juga mengkatalisis reaksi kebalikannya. Jadi pada tahap 2 ini reaksinya bersifat reversible (dapat balik). Pada reaksi tahap ini tidak terjadi penguraian maupun pembentukan ATP.

3) Phosphorilasi fruktosa 6-fosfat menjadi fruktosa 1,6 – biphosphat

Reaksi tahap 3 ini terjadi pemasukan gugus fosfat dari ATP, dikatalisis oleh enzim phosphofruktokinase dengan ion Mg^{2+} sebagai kofaktor menghasilkan fruktosa 1,6-bisphosphat. Reaksi ini sifatnya tidak dapat balik, artinya dalam reaksi pembentukannya tidak langsung merupakan kebalikannya dan dikatalisis oleh enzim yang sama.

4) Pemecahan fruktosa 1,6-biphosphat menjadi triosa phosphate

Reaksi tahap keempat merupakan pemecahan senyawa karbohidrat berat enam dalam bentuk fruktosa 1,6-biphosphat menjadi dua senyawa berat tiga, yaitu gliseraldehida 3-phosphate dan dihidroksiasetonphosphat. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aldolase.

5) Interkonversi dari triosa phoshat

Pada reaksi tahap lima ini terjadi reaksi isomerisasi bolak balik antara kedua senyawa beratom tiga ini, dikatalisis oleh enzim triosaphosphat isomerase. Dalam keadaan normal dihidrokdiaseton phosphat diubah seluruhnya menjadi gliseraldehida 3-fosfat sehingga kemungkinan kehilangan setengah dari energi molekul glukosa dapat dicegah. Sehingga pemecahan satu molekul fruktosa 1,6 biphosphat ini dihasilkan dua molekul gliseraldehida 3-phosphat.

6) Oksidasi gliseraldehida 3-phosphate menjadi 1,3 bisphosphogliserat

Reaksi tahap keenam ini merupakan perubahan gliseraldehida 3-phosphat menjadi asam 1,3-diphosphogliserat, yang melibatkan reaksi pemasukan satu gugus phosphat dari asam phosphat anorganik (Pi), dan oksidasi molekul aldehida menghasilkan molekul asam karboksilat. Reaksi oksidasi ini dikatalisis oleh gliseraldehida 3-phosphat dehidrogenase dan dirangkaikan dengan reaksi reduksi pembentukan NADH (bentuk reduksi dari nikotinamida adenine dinukleotida) dari NAD^+ (bentuk oksidasinya). Pada reaksi ke 6 ini dihasilkan 2 molekul NADH dan 2 molekul 1,3-biphosphoglieserat, yang masing-masing mempunyai satu ikatan phosphat berenergi tinggi.

7) Transfer phosphat dari 1,3 bisphosphogliserat ke ADP

Reaksi tahap ketujuh ini dikatalisis oleh enzim phosphogliserat kinase dengan ion magnesium sebagai kofaktornya. Enzim ini membantu mengubah asam 1,3-biphosphogliserat menjadi asam 3-phosphogliserat karena kehilangan satu molekul phosphat. Reaksi ketujuh pada glikolisis ini merupakan reaksi pertama yang menghasilkan energi. Pada tahap ini glikolisis menggunakan phosphorilasi tingkat substrat untuk menghasilkan ATP, gugus phosphate dari 1,3 diphosphogliserat ditransfer ke ADP untuk menghasilkan ATP. Sehingga pada reaksi ini dihasilkan 2 molekul ATP dan 2 molekul 3-phosphogliserat.

8) Pengubahan 3-phosphogliserat menjadi 2-phosphogliserat

Tahap reaksi kedelapan ini terjadi isomerisasi asam 3-phosphogliserat menjadi asam 2-phosphogliserat, dikatalisis oleh enzim fosfogliserat mutase.

9) Dehidrasi 2-phosphogliserat menjadi phosphoenolpiruvat

Pada tahap reaksi kesembilan ini enzim enolase melepaskan satu molekul H_2O dari asam 2-phosphogliserat menghasilkan asam phosphoenolpiruvat yang memiliki ikatan

phosphat berenergi tinggi. Reaksi ini merupakan reaksi dehidrasi yang disertai redistribusi energi dan molekul, meningkatkan phosphat pada posisi 2 ke tingkat energi tinggi sehingga terbentuk phosphoenolpiruvat.

10) Transfer gugus phosphat dari phosphoenolpirivat ke ADP.

Reaksi tahap akhir glikolisis adalah pembentukan asam piruvat dari phosphoenolpiruvat melalui senyawa antara enolpiruvat. Dalam reaksi yang dikatalisa oleh piruvat kinase ini (dengan ion magnesium sebagai kofaktornya) gugus phosphat yang dilepaskan oleh phosphoenolpiruvat digunakan untuk mensintesis ATP dari ADP. Perubahan enolpiruvat menjadi asam piruvat terjadi secara spontan. Phosphoenolpiruvat adalah senyawa terphosphorilasi dengan energi tertinggi dalam metabolisme. Hasil reaksi inii adalah 2 molekul ATP dan 2 molekul asam piruvat.

Tahap 2: Dekarboksilasi oksidasitif asam piruvat.

Oksidasi asam piruvat terjadi di dalam mitokondria, secara ringkas reaksinya adalah sebagai berikut:



Reaksi ini menghasilkan senyawa berkarbon 2 yang disebut asetil dan mengubah NAD^+ menjadi NADH. Reaksinya kompleks, melibatkan 5 tahap reaksi. Di akhir reaksi, kelompok asetil bergabung dengan koenzim-A sehingga terbentuk senyawa asetil-KoA.

Reaksi oksidasi asam piruvat menjadi asetilkoenzim-A, merupakan reaksi penghubung yang penting antara glikolisis dengan jalur metabolisme lingkaran asam trikarboksilat (Daur Krebs). Reaksi ini dikatalisis oleh kompleks piruvat dehidrogenase, merupakan kerjasama tiga macam enzim dan lima macam koenzim, berlangsung dalam lima tahap reaksi. Kompleks enzim ini terdapat di dalam mitokondria sel-sel eukariotik dan di dalam sitoplasma sel prokariotik.

Kelima tahap reaksi pada oksidasi asam piruvat adalah sebagai berikut:

- 1) Pada reaksi tahap satu piruvat didekarboksilasi (kehilangan gugus karboksilnya) pada saat piruvat bereaksi dengan thiamin pirofosfat yang terikat pada piruvat dehidrogenase (E1) membentuk turunan hidroksietil dari cincin tiazol Thiamin Piro phosphate (TPP).

- 2) Terjadi pemindahan atom H dan gugus asetil dari TPP ke bentuk teroksidasi gugus prostetik lipolisil pada pusat enzim dihidrolipoil transasetilase membentuk asetil tioester pada gugus lipoil tereduksi.
- 3) Molekul Koenzim A bereaksi dengan turunan asetil dari dihidrolipoil transasetilase menghasilkan asetil-KoA dan bentuk tereduksi sempurna (dithiol) dari gugus lipoil.
- 4) Bentuk tereduksi dihidrolipoil transasetilase dikatalisis oleh dihidrolipoil dehidrogenase menyebabkan pemindahan atom hidrogen dari gugus lipoil tereduksi ke gugus prostetik FAD pada dihidrolipoil dehidrogenase,
- 5) Gugus FAD tereduksi pada dihidrolipoil dehidrogenase memindahkan hydrogen ke NAD^+ membentuk NADH.

Sistem piruvat dehidrogenase selain menghasilkan koenzim tereduksi (NADH) juga menghasilkan energi tinggi dalam bentuk ikatan thioester dalam asetil-KoA. Selain itu perubahan asam piruvat menjadi asetil-KoA merupakan persimpangan jalan untuk menuju berbagai biosintesis yang lain. Asetil-KoA yang terbentuk kemudian masuk ke dalam siklus Krebs.

Tahap 3: Siklus Krebs.

Siklus Krebs disebut juga siklus asam trikarboksilat atau siklus asam sitrat merupakan jalur lingkaran metabolisme dimana asetat (khususnya asetil-KoA) dipecah menjadi dua molekul CO_2 dan air dengan menggunakan oksigen. Siklus Krebs terjadi di dalam matriks mitokondria. Dalam mekanismenya melalui delapan tahap reaksi. Setiap satu molekul asetil-KoA yang masuk ke lintas siklus dihasilkan dua molekul CO_2 , tiga NADH, satu FADH_2 dan satu GTP.

Delapan tahap reaksi dalam siklus Krebs adalah sebagai berikut:

1. Reaksi kondensasi

Reaksi tahap satu dari siklus Krebs terjadi kondensasi antara senyawa berkarbon 2 yaitu asetil-KoA dengan senyawa berkarbon 4 yaitu oksaloasetat membentuk senyawa berkarbon 6, yaitu sitrat. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim sitrat sintase dan merupakan reaksi yang tidak dapat balik (*irreversible*).

2. Reaksi isomerisasi

Pada reaksi ini terjadi melalui 2 tahap yaitu: (1) molekul air dibuang dari satu karbon; dan (2) air ditambahkan ke karbon yang berbeda. Hasilnya adalah gugus $-H$ dan $-OH$ bertukar posisi. Produknya adalah isositrat. Pembentukan isositrat dari sitrat melalui sis-akonitat, dikatalisis oleh enzim akonitase.

3. Oksidasi isositrat menjadi α -ketoglutarat dan CO_2

Isositrat mengalami dekarboksilasi oksidatif menjadi α -ketoglutarat melalui pembentukan senyawa antara oksalosuksinat yang berikatan dengan enzim isositrat dehidrogenase dengan NAD^+ berperan sebagai koenzimnya. Mula-mula isositrat dioksidasi, menghasilkan sepasang elektron, dan mengubah NAD^+ menjadi $NADH$. Kemudian terjadi dekarboksilasi, menghasilkan senyawa berkarbon 5 yaitu α -ketoglutarat. Pada reaksi ini dihasilkan satu molekul $NADH$ dan dilepaskan satu molekul CO_2 .

4. Oksidasi α -ketoglutarat menjadi suksinil-KoA

α -ketoglutarat didekarboksilasi oleh kompleks enzim α -ketoglutarat dehidrogenase menjadi suksinil-KoA. Pada reaksi ini dihasilkan satu molekul $NADH$ dan dilepaskan satu molekul CO_2 .

5. Pengubahan suksinil-KoA menjadi Suksinat

Ikatan antara gugus berkarbon 4 suksinil dan Ko-A adalah ikatan berenergi tinggi. Melalui reaksi yang mirip dengan yang terjadi pada glikolisis, ikatan ini memisah. Energi yang dilepaskan dapat digunakan untuk fosforilasi guanosin diphosphat (GDP) menjadi guanosin triphosphat (GTP). GTP siap diubah menjadi ATP. Fragmen berkarbon 4 yang terbentuk disebut suksinat. Pada reaksi pengubahan suksinil-KoA menjadi suksinat, dikatalisis oleh suksinil-KoA sintetase. Pada reaksi ini suksinil-KoA melepaskan koenzimA-nya dengan dirangkaikan reaksi pembentukan GTP dari GDP dan Phosphat anorganik.

6. Oksidasi suksinat menjadi fumarat

Pada tahap reaksi oksidasi suksinat menjadi fumarat, dikatalisis oleh enzim suksinat dehidrogenase yang berikatan dengan Flavin Adenin Dinukleotida (FAD) sebagai koenzimnya. Dalam reaksi ini FAD berperan sebagai akseptor hydrogen. Pada reaksi ini dihasilkan satu molekul $FADH_2$.

7. Hidratasi fumarat menjadi malat

Pada reaksi tahap hidratasi ini terjadi penambahan satu molekul air ke ikatan rangkap fumarat, menghasilkan malat. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim fumarase.

8. Oksidasi malat menjadi oksaloasetat

Pada tahap akhir siklus Krebs ini, malat dioksidasi menjadi oksaloasetat oleh enzim malat dehidrogenase yang berikatan dengan NAD^+ . Pada reaksi ini dihasilkan satu molekul NADH. Oksaloasetat berkarbon empat dapat bergabung dengan gugus asetil berkarbon dua yaitu asetil-KoA dan siklus Krebs kembali berulang.

Siklus Krebs merupakan seri reaksi dalam mitokondria yang merupakan oksidasi residu asetil menjadi CO_2 serta membebaskan hidrogen ekuivalen yang akhirnya membentuk air. Residu asetil ini dalam bentuk asetil-KoA yang merupakan ester dari koenzim A. Produksi siklus Krebs adalah 1 molekul ATP per molekul asetil-KoA dan banyak elektron yang dapat diberikan ke transport elektron (3 NADH dan 1 FADH_2) untuk mensintesis lebih banyak ATP (11 ATP).

Asetil-KoA merupakan titik sentral jalur-jalur metabolik utama. Hampir semua molekul karbohidrat dan lemak membentuk asetil-KoA selama katabolisme oksidatifnya, demikian pula beberapa asam amino hasil pemecahan protein. Disamping itu asetil-KoA berperan sebagai sumber unit asetil dalam proses anabolisme untuk sintesis asam lemak rantai panjang, kolesterol, steroid dan benda keton.

Fungsi utama siklus Krebs adalah sebagai jalur akhir oksidasi karbohidrat, lipid dan protein, karena glukosa, asam lemak dan beberapa asam amino dimetabolisme melalui asetil-KoA. Disamping itu asetil-KoA merupakan mekanisme pembebasan energi bebas dari karbohidrat, lipid dan protein. Selama oksidasi ini ekuivalen reduksi dalam bentuk hidrogen atau elektron terbentuk akibat aktivitas dehidrogenase. Ekuivalen reduksi ini kemudian masuk ke rantai respirasi dimana sejumlah besar fosfat berenergi tinggi dihasilkan dalam proses fosforilasi oksidatif.

Enzim-enzim yang dibutuhkan oleh siklus ini terdapat dalam matriks mitokondria, baik dalam keadaan bebas atau terikat pada membran bagian dalam mitokondria. Transfer ekuivalen reduksi ke enzim-enzim pada rantai respirasi berlangsung pada bagian dalam membran mitokondria.

Siklus asam sitrat bersifat rangkap atau amfibolik, disamping peranannya dalam katabolisme juga dapat berperan sebagai sumber molekul-molekul dalam proses anabolisme seperti sintesis lemak, asam amino dan glukosa. Sebagai akibat oksidasi yang dikatalisis oleh enzim-enzim dehidrogenase, dihasilkan 3 molekul NADH, satu molekul FADH₂ dan satu molekul GTP untuk setiap molekul asetil-KoA yang masuk ke lintas siklus Krebs.

Tahap 4: Transport elektron dan fosforilasi oksidatif.

Rantai transport elektron dimana NADH dan FADH₂ memindahkan elektronnya ke alat angkut elektron yang berada di membran mitokondria. Energi dalam elektron digunakan untuk menghasilkan ATP.

Transport elektron atau pengangkutan elektron yang dirangkaikan dengan fosforilasi yang bersifat oksidasi (pembentukan ATP dari ADP + Pi) merupakan tahap metabolisme keempat atau tahap terakhir dari proses respirasi, yaitu oksidasi glukosa menghasilkan CO₂ + H₂O dan ATP. Transport elektron yang juga disebut dengan rantai respirasi, terjadi dalam membran mitokondria

Pengangkutan elektron dimulai dengan masuknya pasangan elektron atau ekuivalen hidrogennya, dari senyawa substrat pernafasan ke dalam rantai pernafasan. Elektron tersebut selanjutnya dialirkan sepanjang rantai melalui berbagai senyawa (dan enzim oksidasi-reduksi) pembawa elektron yang akhirnya ditangkap oleh molekul oksigen pada salah satu ujung rantai. Proses ini merupakan kegiatan sel yang utama untuk menghasilkan energi dalam bentuk ikatan fosfat, yaitu ATP, yang dihasilkan melalui suatu proses yang disebut fosforilasi oksidatif (fosforilasi yang bersifat oksidasi). Dalam reaksi ini reaksi endergonik pembentukan ATP dari ADP + Pi dirangkaikan dengan reaksi eksergonik oksidasi-reduksi pengangkutan elektron dari suatu molekul dengan potensial oksidasi-reduksi yang lebih negatif ke yang kurang negatif. Jadi mengalirnya elektron dalam rantai pernafasan berlangsung dari molekul pembawa elektron yang mempunyai potensial oksidasi-reduksi yang lebih negatif ke yang kurang negatif, atau dari yang kurang positif ke yang lebih positif.

Pengangkutan elektron ini pada organisme prokariotik terjadi pada sistem membran yang lain, hal ini dikarenakan organisme prokariotik tidak mempunyai mitokondria. Jumlah elektron per molekul pembawa elektron yang diangkut melalui rantai pernafasan terdiri dari 2 macam yaitu: (1) pengangkutan elektron dari NADH ke ubiquinon yang berlangsung dengan tahap dua elektron; dan (2) dari ubiquinon ke O_2 yang berlangsung dengan tahap satu elektron.

Fosforilasi bersifat oksidasi. Pada reaksi fosforilasi bersifat oksidasi ini dihasilkan 3 molekul ATP untuk setiap pasang elektron yang dibawa NADH ke O_2 , atau 2 molekul ATP untuk pengangkutan elektron dari $FADH_2$ ke O_2 . Dengan demikian setiap substrat yang melepaskan elektronnya ke NADH akan menghasilkan 3 molekul ATP dan mereduksi satu atom oksigen, sehingga nisbah P terhadap O (harga p/O) untuk substrat ini adalah 3.

D. Respirasi aerob dan respirasi anaerob

Sebagian besar ATP yang dihasilkan respirasi seluler adalah hasil fosforilasi oksidatif, oleh karena itu hasilnya sangat tergantung pada pasokan oksigen yang cukup, dan disebut dengan respirasi aerob. Ada beberapa jenis tumbuhan yang kegiatan respirasinya menurun apabila kadar oksigen di udara berada di bawah normal, misalnya bayam, wortel dan beberapa tumbuhan lainnya.

Apabila konsentrasi oksigen dalam udara rendah sekali atau bahkan sama sekali tidak ada, bukan berarti kegiatan respirasi terhenti. Respirasi masih berlangsung secara anaerob. Respirasi anaerob disebut pula fermentasi atau respirasi intramolekul. Tujuan fermentasi sama dengan respirasi aerob yaitu mendapatkan energi. Hanya saja, energi yang dihasilkan lebih sedikit daripada respirasi aerob. Fermentasi dapat terjadi pada fungi, bakteri, hewan dan manusia. Dua jenis yang umum dari fermentasi adalah fermentasi asam laktat dan fermentasi alkohol.

Fermentasi asam laktat. Fermentasi ini terjadi apabila transfer hidrogen (seperti yang terjadi pada respirasi seluler) tidak mungkin terjadi atau terhambat. Pada respirasi ini tidak ada oksigen, jadi apabila tidak ada oksigen atau oksigen tidak cukup atau terjadi blokasi, maka organisme akan berespirasi secara anaerob. Karena O_2 tidak ada, maka

asam piruvat akan berlaku sebagai akseptor hidrogen (hal ini tidak seperti biasa, yaitu sebagai bahan bakar). Asam piruvat akan direduksi langsung oleh NADH membentuk asam laktat sebagai produk limbahnya, tanpa melepas CO₂. Seperti pada otot-otot yang bekerja terlalu berat, yang oksigennya tidak cukup untuk respirasi sel, maka asam piruvat akan direduksi oleh NADH menjadi asam laktat dikatalisis oleh laktat dehidrogenase. Energi yang tersimpan dalam NADH dialihkan kembali pada bagian karbohidratnya. Dalam hal ini energi yang dihasilkan hanyalah 7 % dari respirasi aerob, sebab blokasi dari lintasan CO₂ menyebabkan ATP biasa tidak terbentuk, juga karena asam piruvat berlaku sebagai akseptor, maka energi potensial padanya tidak dapat dipakai, sehingga sebagian besar energi yang ada di dalam bahan bakar itu (glukosa) masih terperangkap di dalam limbah (asam laktat). Selain itu proses tersebut juga dapat berbahaya, karena asam laktat adalah suatu asam maka pembentukannya di dalam otot dapat menurunkan pH sampai pada suatu titik yang mengakibatkan gangguan serius pada fungsi otot. Dalam keadaan normal laktat yang terakumulasi sebagai produk limbah dapat menyebabkan otot letih dan nyeri, tetapi secara perlahan-lahan dibawa oleh darah ke hati untuk diubah kembali menjadi piruvat dan akhirnya disintesis menjadi glukosa kembali. Meskipun fermentasi asam laktat ini suatu pemborosan (hanya dihasilkan 2 ATP, sedangkan pada respirasi aerob dihasilkan 38 ATP), tetapi pada proses itu menghasilkan sumber ATP bagi sel-sel yang sangat memerlukannya karena sel-sel tersebut tidak bisa memperoleh cukup oksigen yang diperlukan untuk membantu respirasi aerob ketika dalam keadaan darurat, yakni ketika melakukan aktivitas fisik yang tinggi dan suplai oksigen kurang walaupun pernapasan dipercepat. Fermentasi asam laktat oleh fungi dan bakteri tertentu digunakan dalam industri susu untuk membuat keju dan yogurt.

Fermentasi alkohol. Sampai terbentuknya asam piruvat, proses yang terjadi pada respirasi aerob sama dengan fermentasi alkohol. Pada fermentasi alkohol asam piruvat diubah menjadi etanol (etil alkohol) melalui 2 langkah reaksi, yaitu (1) pelepasan Karbon dioksida dari piruvat, menjadi senyawa asetaldehida berkarbon dua dikatalisis oleh piruvat dekarboksilase; (2) asetaldehida direduksi oleh NADH menjadi etanol dikatalisis oleh alkohol dehidrogenase. Dalam hal ini energi yang tersimpan dalam NADH akan dialihkan kembali pada bagian karbohidratnya. Sebagaimana halnya dengan proses

fermentasi asam laktat (hasilnya 2 ATP), proses ini merupakan suatu pemborosan. Sebagian besar energi yang terkandung di dalam glukosa masih terdapat di dalam etanol (inilah sebabnya mengapa etanol sering dipakai sebagai bahan bakar mesin). Sebagaimana halnya dengan proses fermentasi asam laktat, proses ini juga berbahaya. Ragi meracuni diri sendiri jika konsentrasi etanol mencapai $\pm 13\%$. Fermentasi alkohol oleh ragi, suatu jamur, digunakan dalam pembuatan bir dan anggur. Banyak bakteri juga melakukan fermentasi alkohol dalam kondisi anaerobik.

E. Hubungan Metabolisme Karbohidrat, Lemak Dan Protein

Selama sehari ada 3 kondisi metabolisme yaitu kenyang (setelah makan), diantara waktu makan (pagi-siang dan siang-malam) dan sepanjang malam sewaktu tidur. Kalau jumlah dan kualitas makan serta waktu makan terpenuhi, maka tubuh akan terasa nyaman dan tidak terasa ada perbedaan. Mengapa demikian ?

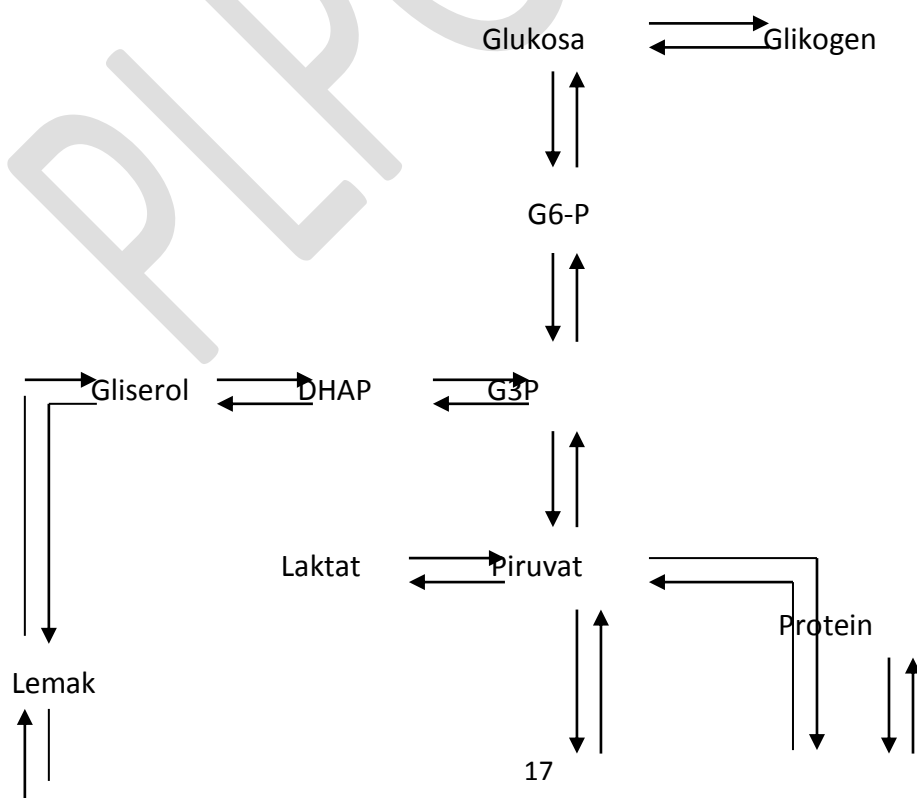
Hal ini dikarenakan adanya hubungan atau keterkaitan antara metabolisme ketiga zat makanan, yaitu karbohidrat, lemak dan protein. Dalam keadaan kenyang yang paling berperan sebagai sumber energi adalah karbohidrat, asam lemak dan gliserol lebih banyak diubah menjadi lemak untuk disimpan sebagai cadangan energi, asam amino lebih banyak diubah menjadi protein yang digunakan sebagai senyawa penyusun struktur tubuh sel. Dalam keadaan lapar yang paling berperan sebagai sumber energi adalah lemak, lemak lebih banyak diubah menjadi asam lemak dan gliserol untuk pemenuhan kebutuhan energi, protein hanya sedikit diubah menjadi asam amino untuk memenuhi kebutuhan tubuh. Pada lapar yang berkepanjangan protein lebih banyak diubah untuk pemenuhan kebutuhan energi, hal ini dikarenakan cadangan lemaknya sudah menipis. Reaksi hubungan atau keterkaitan antara metabolisme karbohidrat, lemak dan protein dapat dilihat pada Gambar 1 dan prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut.

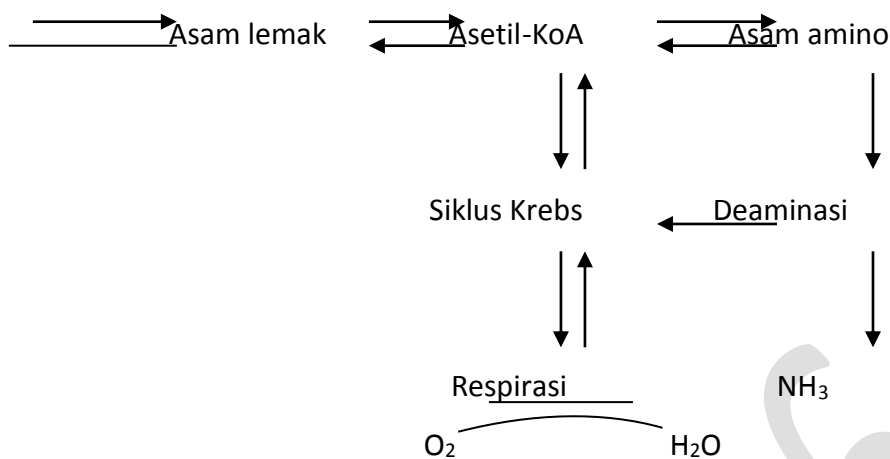
Degradasi molekul dalam proses metabolisme dibagi menjadi 3 tahap. Tahap pertama. Polisakarida dihidrolisis menjadi monosakarida, protein dihidrolisis menjadi asam amino dan lemak sebagai sumber utama lipid dihidrolisis menjadi asam lemak dan gliserol. Tahap kedua monosakarida, asam amino, gliserol dan asam lemak didegradasi lanjut menjadi asetil -KoA melalui proses pembentukan beberapa senyawa fosfat kaya

energi. Dalam glikolisis heksosa diubah menjadi asam piruvat kemudian menjadi asetil-KoA melalui reaksi yang glikolisis dan dekarboksilasi asam piruvat. Hal yang sama terjadi pada asam lemak rantai panjang dioksidasi menjadi asetil-KoA, sementara gliserol diubah menjadi asam piruvat, asetil-KoA dan glukosa. Khusus untuk degradasi asam amino keadaannya berbeda. Dalam tahap kedua asam amino alanin, serin, treonin, glisin dan sistein, didegradasi menjadi piruvat dan diubah kembali menjadi asetil-KoA.

Asam amino prolin, histidin, glutamin dan arginin, didegradasi menjadi asam glutamat melalui proses transaminasi menghasilkan α -ketoglutarat, molekul antara siklus Krebs. Asam aspartat dan asparagin ditransaminasi menjadi oksaloasetat, molekul antara dalam siklus Krebs. Asam-asam amino seperti leusin, triptofan, lisin, fenilalanin dan tirosin didegradasi menjadi asetoasetol-KoA dan diubah kembali menjadi asetil-KoA. Sementara asam-asam amino isoleusin, metionin dan valin diubah menjadi suksinil-KoA selama degradasi. Fenilalanin dan tirosin dapat juga didegradasi secara oksidatif membentuk fumarat.

Kerangka karbon asam amino menghasilkan senyawa antara untuk siklus Krebs atau asetil-KoA. Produk yang sama dihasilkan dari karbohidrat dan lipid selama oksidasi senyawa tersebut. Dalam tahap ketiga, ATP kaya energi dihasilkan melalui fosforilasi oksidatif.





Gambar 1. Keterkaitan antara metabolisme karbohidrat, lemak dan protein

Proses anabolisme makromolekul juga berlangsung dalam 3 tahap. Tahap pertama, sintesis protein dimulai dari pembentukan asam α -keto dan pemula yang lain. Sintesis lipid dimulai dengan pembentukan molekul asam asetat, malonat dan lainnya. Sintesis karbohidrat dimulai dari molekul piruvat, malat dan sebagainya. Selanjutnya pada tahap kedua, asam α -keto teraminasi oleh donor gugus amino membentuk asam amino, gugus asetil dibangun menjadi asam lemak, piruvat dan malat menjadi prekursor untuk pembentukan monosakarida. Tahap terakhir anabolisme, asam amino disusun menjadi rantai polipeptida membentuk berbagai jenis protein; asam lemak dan molekul lain dirangkai menjadi berbagai lipid; monosakarida dirangkai dengan ikatan glikosidik menjadi berbagai polisakarida.

F. Keterkaitan Metabolisme Karbohidrat dengan Metabolisme Lemak

Secara garis besar, proses metabolisme karbohidrat dapat digambarkan sebagai berikut :

glukosa \rightarrow piruvat \rightarrow asetil-KoA \rightarrow siklus Krebs \rightarrow energi + CO₂ + H₂O

Gliserol hasil pemecahan lemak memasuki jalur metabolisme karbohidrat melalui reaksi antara glukosa dan piruvat (gliserol piruvat masuk jalur metabolime karbohidrat). Asam lemak mengalami beta oksidasi menjadi unit-unit yang terdiri atas dua karbon. Tiap unit

dua karbon mengikat satu molekul KoA menjadi molekul asetil-KoA yang dapat masuk ke jalur metabolisme karbohidrat.

Gliserol dapat berubah menjadi glukosa atau piruvat, tergantung kebutuhan sel akan energi. Demikian pula asetil-KoA. Jika sel tidak membutuhkan energi atau kebutuhan energi telah tercukupi, maka asetil-KoA yang berasal dari beta oksidasi akan disintesis kembali menjadi komponen lemak. Karbohidrat pun jika berlebih akan diubah menjadi lemak yang disimpan di jaringan lemak tubuh di bawah kulit yaitu jaringan adiposa.

G. Keterkaitan Metabolisme Karbohidrat dengan Metabolisme Protein

Protein tubuh berada dalam keadaan dinamis, yang secara bergantian dirombak dan disusun kembali menjadi protein. Suatu molekul asam amino terdiri dari gugus karboksil (-COOH) dan gugus amino (-NH₂). Asam amino paling sederhana adalah glisin (CH₂(NH₂)COOH). Protein merupakan sumber energi sesudah karbohidrat dan lemak. Artinya, tubuh akan membongkar protein untuk dilepaskan energinya apabila di dalam tubuh sudah tidak ada lagi karbohidrat dan lemak. Misalnya waktu berkerja keras atau waktu kelaparan yang sangat.

Tubuh makhluk hidup menjalankan semua proses metabolisme secara efisien sehingga senyawa antara yang tidak berlanjut ke tahapan berikutnya akan disintesis menjadi senyawa lain yang berguna bagi tubuh. Asam amino mengalami katabolisme melalui tiga cara, yaitu sebagai berikut :

- a. Asam amino glukogenik diubah menjadi piruvat. Asam piruvat kemudian akan memasuki jalur metabolisme karbohidrat.
- b. Asam amino ketogenik diubah menjadi asetil-KoA yang dapat memasuki jalur metabolisme lemak.
- c. Asama amino yang bukan glukogenik dan bukan ketogenik, misalnya asam glutamat, dideaminasi dan langsung memasuki siklus Krebs.

Melalui ketiga cara tersebut, akhirnya asam amino (protein) juga dapat menghasilkan energi dalam bentuk ATP, karbon dioksida, dan air, seperti halnya karbohidrat.

H. Perbedaan anabolisme dengan Katabolisme

Anabolisme tidak merupakan reaksi kebalikan dari katabolisme meskipun anabolisme merupakan proses yang menggunakan energi untuk membentuk/membangun senyawa organik kompleks dari senyawa sederhana atau senyawa anorganik dan katabolisme merupakan proses yang membebaskan energi dengan cara memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana. Mengapa demikian ?

Sel merupakan sistem kimia dalam keadaan mantap. Proses metabolisme, baik reaksi katabolisme maupun reaksi anabolisme merupakan proses yang berjalan serempak. Pembahasan yang dilakukan secara sendiri-sendiri hanya untuk mempermudah pemahaman dalam mempelajari reaksi-reaksi kimia dalam makhluk hidup.

Katabolisme dan anabolisme merupakan proses yang saling melengkapi dan berkaitan satu dengan yang lain. Secara keseluruhan proses anabolisme dan katabolisme harus berjalan bersama-sama, karena setiap pasang proses menyediakan energi atau bahan yang diperlukan oleh pasangan yang lain. Hubungan antara keduanya adalah sebagai berikut: (1) Aspek reduksi dan oksidasi, katabolisme menggunakan ($\text{NAD}^+ + \text{NADP}^+$) dan menghasilkan bentuk reduksi ($\text{NADH} + \text{NADPH}$) sementara proses anabolisme membutuhkan bentuk reduksi dan menghasilkan bentuk oksidasi; (2) Aspek energi, katabolisme merupakan eksergonik (menghasilkan energi) dengan menggunakan ADP dan Pi menghasilkan ATP. Senyawa ATP yang dihasilkan kemudian digunakan kembali dalam reaksi endergonik (membutuhkan energi) pada proses anabolisme dan kembali menghasilkan ADP (dan AMP); (3) Aspek materi, produk akhir antara yang dihasilkan dalam katabolisme umumnya menjadi materi awal dalam anabolisme.

I. Faktor yang mempengaruhi fotosintesis

Tanaman hijau yang ditanam di tempat yang lingkungannya berbeda, produksi maupun pertumbuhannya juga berbeda. Mengapa demikian ?

Produksi maupun pertumbuhan tumbuhan hijau dipengaruhi oleh laju fotosintesis. Laju fotosintesis dipengaruhi oleh beberapa faktor, baik faktor eksternal

maupun faktor internal. Faktor eksternal yang mempengaruhi laju fotosintesis adalah: (1) Intensitas cahaya, semakin rendah intensitas cahaya semakin rendah laju fotosintesis karena energi yang diserap tidak mencukupi untuk fotosintesis; (2) kadar karbondioksida, laju fotosintesis dapat ditingkatkan dengan meningkatnya kadar CO₂ udara tetapi bila kadarnya terlalu tinggi dapat meracuni atau menyebabkan stomata tertutup sehingga laju fotosintesis terganggu; (3) suhu, semakin tinggi suhu semakin tinggi pula laju fotosintesis sampai pada batas rentang suhu tertentu; (4) kadar air, kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, menghambat penyerapan karbon dioksida sehingga mengurangi laju fotosintesis.

Faktor internal yang mempengaruhi laju fotosintesis diantaranya adalah: (1) kandungan klorofil, daun yang menguning menunjukkan kadar klorofil berkurang. Hal ini akan menurunkan laju fotosintesis; (2) kadar fotosintat (hasil fotosintesis), jika kadar fotosintat seperti gula berkurang, laju fotosintesis akan naik. Bila kadar fotosintat bertambah atau bahkan sampai jenuh, laju fotosintesis akan berkurang; dan (3) tahap pertumbuhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa laju fotosintesis jauh lebih tinggi pada tumbuhan yang sedang berkecambah bila dibandingkan dengan tumbuhan dewasa. Hal ini dikarenakan tumbuhan berkecambah memerlukan lebih banyak energi dan makanan untuk tumbuh.