

## **BAB. II**

### **ENERGI UNTUK UNGGAS**

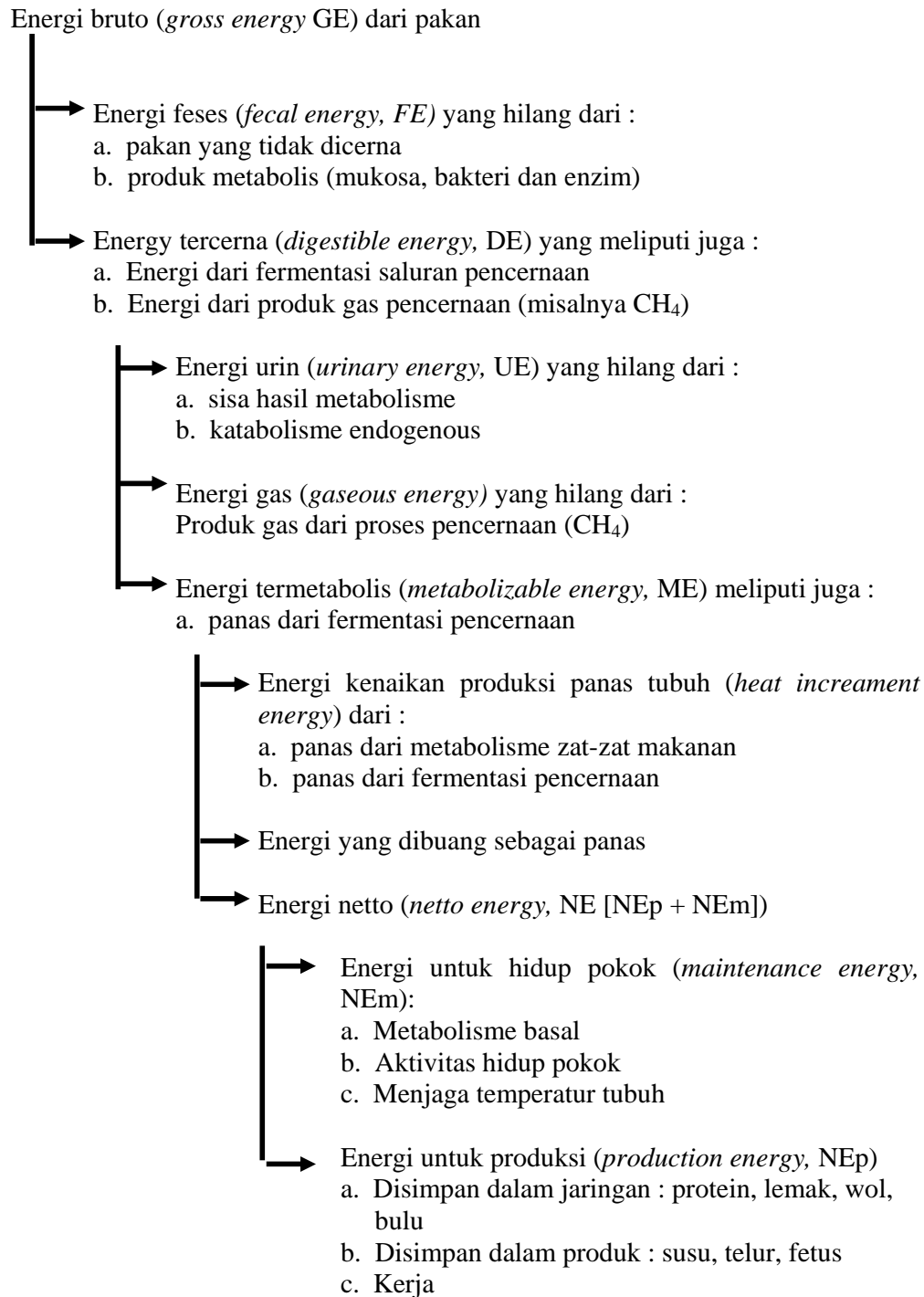
#### **2.1. Pengertian Energi**

Istilah energi berasal dari Yunani, yang terdiri atas kata "*en*" berarti di dalam dan "*ergon*" berarti kerja, sehingga energi dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan untuk melakukan pekerjaan dan berbagai bentuk kegiatan (kimia, elektrik, radiasi dan termal) dan dapat diubah. Beberapa bentuk energi yang telah dikenal antara lain : energi mekanik, energi panas, energi listrik, energi cahaya, energi nuklir dan energi kimia. Energi radiasi dari matahari yang digunakan tanaman untuk membentuk zat-zat makanan dapat digunakan oleh ternak untuk menghasilkan kerja mekanik. Sebagian besar energi yang terdapat di bumi berasal dari matahari, sedang energi yang digunakan untuk kerja adalah energi kimia yang disimpan dalam pakan. Energi dalam pakan umumnya disebut dengan energi biologis. Energi biologis terdiri atas beberapa tingkatan sebagaimana terlihat pada Gambar 2.1.

Bagian energi biologis dari pakan dapat dicari berdasarkan beberapa ketentuan sebagai berikut : jumlah konsumsi pakan, jumlah ekskresi feses, jumlah ekskresi urin, jumlah ekskresi gas metan dan kenaikan suhu yang terjadi dan hilang sewaktu ternak puasa. Dengan ketentuan tersebut di atas maka nilai energi biologis dari pakan dapat dicari.

Energi kotor (*gross energy*, GE) adalah sejumlah panas yang dilepaskan oleh satu unit bobot bahan kering pakan bila dioksidasi sempurna. Energi kotor bahan pakan ditentukan dengan jalan membakar contoh bahan pakan dalam bom kalorimeter. Kandungan GE biasanya dinyatakan dalam satuan Mkal GE/kg BK. Tidak semua GE bahan pakan dapat dicerna, sebagian akan dikeluarkan bersama feses. Energi kotor dalam feses disebut sebagai *fecal energy* (FE). Energi feses ini selain berasal dari pakan yang tidak dicerna juga berasal dari saluran pencernaan yang berupa mukosa, enzim dan bakteri.

Energi tercerna (*digestible energy*, DE) adalah berapa banyak GE yang dapat dicerna dengan cara mengurangi GE bahan pakan dengan GE feses (FE). Satuan DE adalah Mkal DE/kg BK. Tidak semua energi yang dicerna akan



**Gambar 2.1. Bagan energi**

diserap. Pada unggas penentuan DE sulit dilakukan karena jalur pengeluaran urin dan feses bersatu. Ekskreta unggas merupakan campuran antara urin dengan feses. Jika penentuan DE unggas itu diperlukan, maka terpaksa unggas tersebut harus dibedah untuk memisahkan urin dengan feses sebelum tercampur.

Energi termetabolis (ME) adalah energi kotor dari pakan yang dapat digunakan oleh tubuh. Pada unggas, ME diperoleh dari pengurangan GE pakan dengan energi ekskreta. Energi ekskreta berasal dari campuran energi feses dan urin. Energi urin adalah energi kotor dari urin. Energi urin ini berasal dari zat-zat makanan yang telah diabsorpsi tetapi tidak mengalami oksidasi sempurna dan bahan endogenous yang terdapat dalam urin.

Energi kenaikan produksi panas (HI) adalah energi yang berupa kenaikan produksi panas yang terjadi akibat proses metabolisme dan fermentasi dari zat-zat makanan. Energi ini dapat digunakan untuk mempertahankan suhu tubuh, tetapi bila berlebihan merupakan pemborosan. Nama lain dari HI adalah *calorigenic effect* atau *thermogenic action* dan kadang-kadang disebut *specific dynamic action*. Sampai dengan pengukuran ME, pengukuran dengan teknik bom kalorimeter dapat digunakan. Pengukuran HI tidak dapat lagi menggunakan bom kalorimeter, namun dengan teknik kalorimetri hewan. Kenaikan produksi panas ini sebagian besar berasal dari metabolisme zat-zat makanan dalam tubuh.

Energi netto (NE) adalah sejumlah energi yang dapat digunakan hanya untuk pemeliharaan/hidup pokok (*maintenance*) atau untuk pemeliharaan/hidup pokok beserta produksi. NE dapat juga diekspresikan sebagai GE dari penambahan bobot jaringan dan atau dari sintesis produk beserta energi yang dibutuhkan untuk pemeliharaan/hidup pokok. Secara umum energi bersih untuk pemeliharaan/hidup pokok disebut NEm dan energi untuk produksi disebut NEp. NEm adalah NE dalam tubuh yang digunakan untuk tetap dalam kondisi keseimbangan. Dalam tingkat ini tidak terjadi penambahan atau pengurangan energi dalam jaringan tubuh. Nilai NEm umumnya ditentukan dengan mengukur produksi panas hewan percobaan yang berstatus gizi baik, dipuaskan, ada dalam lingkungan termonetral dan beristirahat. Produksi panas hewan yang berada dalam kondisi seperti itu disebut *Basal Metabolic Rate* (BMR). NEp adalah NE

yang digunakan untuk kerja di luar kemauan, penambahan bobot jaringan (pertumbuhan, atau produksi lemak), telur, bulu dan sebagainya.

Dari berbagai ketentuan di atas diartikan bahwa semua energi yang terdapat dalam feses dan dalam urin dianggap hanya berasal dari pakan saja, dengan demikian maka nilai DE, ME dan NE bukan merupakan nilai energi yang sebenarnya, akan tetapi merupakan nilai energi semu atau nilai yang tampak atau *apparent energy*. Oleh karena itu untuk nilai energi yang sebenarnya atau *true energy* harus dikoreksi terlebih dahulu dengan energi yang berasal dari bukan sisa pakan atau yang disebut energi endogenous.

Penggunaan energi diukur dalam kilokalori (kcal) atau kalori (kal). Satu kilokalori atau satu kalori adalah banyaknya panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu liter air dari 14,5°C menjadi 15,5°C. Ukuran lainnya adalah kilojoule (kJ) yang didefinisikan sebagai energi yang dibutuhkan untuk mengangkat benda satu kilogram setinggi satu meter. Satu kilokalori sama dengan 4,2 kJ.

Energi pakan terkandung dalam molekul karbohidrat, lemak, protein dan alkohol. Oksidasi metabolit dari molekul-molekul ini membebaskan energi dalam bentuk ATP dan senyawa-senyawa berenergi tinggi lain yang digunakan untuk mempertahankan gradien konsentrasi ion-ion, menjalankan reaksi biosintetik, untuk transport dan sekresi molekul melewati membran sel dan untuk menyediakan tenaga sel yang bergerak dan aktivitas otot.

## **2.2. Energi dari Karbohidrat**

### **2.2.1. Pengertian karbohidrat**

Karbohidrat mempunyai struktur kimia yang mengandung C, H dan O. Semakin kompleks susunan struktur kimia, maka akan semakin sulit dicerna. Hidrogen dan oksigen biasanya berada dalam rasio yang sama seperti yang terdapat dalam molekul air yaitu H<sub>2</sub>O (2H dan 1O). Klasifikasi karbohidrat menurut urutan kompleksitas terdiri atas monosakarida, disakarida, trisakarida dan polisakarida.

Monosakarida atau gula sederhana yang penting mencakup pentosa ( $C_5H_{10}O_5$ ) yaitu gula dengan 5 atom C dan heksosa ( $C_6H_{12}O_6$ ). Pentosa terdapat di alam dalam jumlah sedikit. Pentosa dapat dihasilkan melalui hidrolisis pentosan yang terdapat dalam kayu, bonggol jagung, dan jerami. Pentosa terdiri atas arabinosa, ribosa, dan xilosa. Heksosa bersifat lebih umum dan lebih penting dalam pakan dibandingkan dengan monosakarida lainnya. Heksosa terdiri atas fruktosa, galaktosa, manosa dan glukosa. Fruktosa (levulosa) terdapat bebas dalam buah yang masak dan dalam madu. Galaktosa berada dalam senyawa dengan glukosa membentuk laktosa (gula susu). Glukosa (dekstrosa) terdapat dalam madu, dan bentuk inilah yang terdapat dalam darah.

Disakarida terbentuk melalui kombinasi kimia dua molekul monosakarida dengan pembebasan satu molekul air. Bentuk disakarida yang umum adalah sukrosa, maltosa, laktosa dan selobiosa. Sukrosa merupakan gabungan dari glukosa dan fruktosa dengan ikatan  $\alpha$  (1 - 5) yang dikenal sebagai gula dalam kehidupan sehari-hari. Sukrosa umumnya terdapat dalam gula tebu, gula bit serta gula maple. Maltosa merupakan gabungan glukosa dan glukosa dengan ikatan  $\alpha$  (1 - 4). Maltosa terbentuk dari proses hidrolisis pati. Laktosa (gula susu) terbentuk dari gabungan galaktosa dan glukosa dengan ikatan  $\beta$  (1 - 4). Selobiosa merupakan gabungan dari glukosa dan glukosa dengan ikatan  $\beta$  (1 - 4). Selobiosa adalah oligosakarida yang terbentuk dari pencernaan selulosa oleh enzim selulase yang berasal dari mikroorganisme.

Trisakarida terdiri atas melezitosa dan rafinosa. Rafinosa terdiri atas masing-masing satu molekul glukosa, galaktosa dan fruktosa. Dalam jumlah tertentu terdapat dalam gula bit dan biji kapas. Melezitosa terdiri atas dua molekul glukosa dan satu molekul fruktosa.

Polisakarida tersusun atas sejumlah molekul gula sederhana. Kebanyakan polisakarida berbentuk heksosan yang tersusun dari gula heksosa, tetapi ada juga pentosan yang tersusun oleh gula pentosa, di samping juga ada yang dalam bentuk campuran yaitu kitin, hemiselulosa, musilage dan pektin. Polisakarida heksosan merupakan komponen utama dari zat-zat makanan yang terdapat dalam bahan asal tanaman. Heksosan terdiri atas selulosa, dekstrin, glikogen, inulin dan pati. Pati

terdiri atas  $\alpha$  amilosa [ikatan  $\alpha$  (1 - 4)] dan amilopektin [ikatan  $\alpha$  (1 - 4) dan  $\alpha$  (1 - 6)]. Pati merupakan persediaan utama makanan pada kebanyakan tumbuhan, apabila terurai akan menjadi dekstrin [glukosa, ikatan  $\alpha$  (1 - 4) dan  $\alpha$  (1 - 6)], kemudian menjadi maltosa dan akhirnya menjadi glukosa. Pati merupakan sumber energi yang sangat baik bagi ternak. Selulosa [glukosa, ikatan  $\beta$  (1 - 4)] menyusun sebagian besar struktur tanaman, sifatnya lebih kompleks dan tahan terhadap hidrolisis dibandingkan dengan pati. Sebagian besar cadangan karbohidrat dalam tubuh hewan berada dalam bentuk glikogen [glukosa, ikatan  $\alpha$  (1 - 4) dan  $\alpha$  (1 - 6)] yang terdapat dalam hati dan otot. Glikogen larut dalam air dan hasil akhir hidrolisis adalah glukosa. Glikogen dan pati merupakan bentuk simpanan atau cadangan untuk gula. Inulin [fruktosa, ikatan  $\beta$  (2 - 1)] adalah polisakarida yang apabila dihidrolisis akan dihasilkan fruktosa. Polisakarida ini merupakan cadangan (sebagai ganti pati), khususnya dalam tanaman yang disebut *artichke Yerusalem* (seperti tanaman bunga matahari). Inulin digunakan untuk pengujian *clearance rate* pada fungsi ginjal karena zat tersebut melintas dengan bebas melalui glomerulus ginjal dan tidak disekresi atau diserap oleh tubuli ginjal. Kitin merupakan polisakarida campuran yang terdapat dalam eksoskeleton (kulit yang keras) pada berbagai serangga.

### **2.2.2. Pencernaan dan penyerapan karbohidrat**

Karbohidrase merupakan enzim-enzim yang memecah karbohidrat menjadi gula-gula yang lebih sederhana. Amilase berfungsi merombak pati menjadi gula-gula yang lebih sederhana. Oligosakaridase memecah oligosakarida menjadi gula sederhana. Disakarida sukrosa dan maltosa secara berturut-turut dihidrolisis oleh sukrase dan maltase. Sekresi saliva umumnya mengandung enzim amilase. Pati yang tidak dirombak dalam proventrikulus oleh amilase air liur, dalam lingkungan netral usus dengan cepat diubah menjadi maltosa oleh amilase pankreas. Dalam cairan usus mungkin terdapat juga sedikit amilase. Disakarida maltosa, sukrosa dan laktosa dirombak oleh enzim-enzim khusus yang berturut-turut adalah maltase, sukrase dan laktase. Enzim-enzim ini dan enzim-

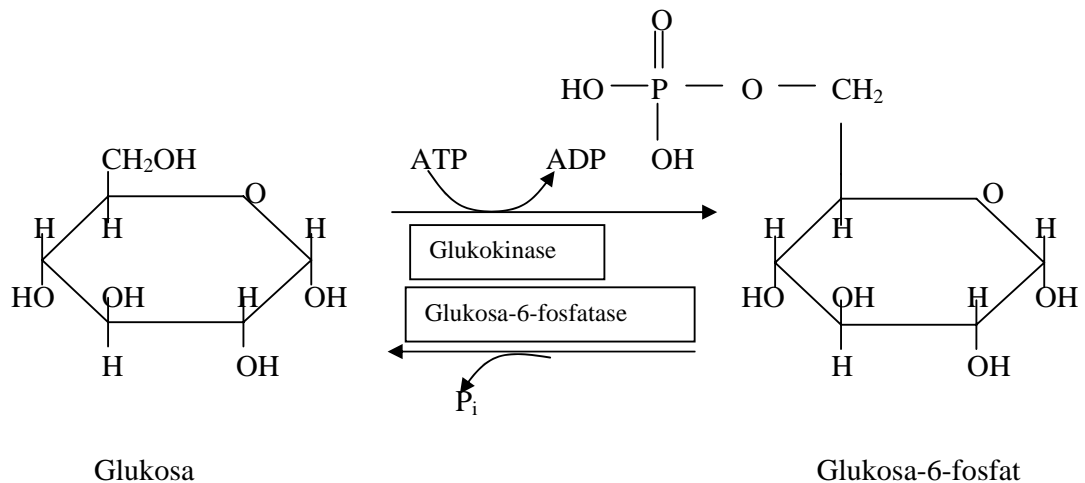
enzim yang lain yang dihasilkan oleh sel-sel usus tidak sepenuhnya terdapat dalam keadaan bebas di dalam lumen usus. Hal ini terbukti karena ekstrak bebas sel dari cairan usus hanya mengandung sedikit enzim tersebut. Tetapi enzim-enzim tersebut terdapat pada tempat mikrovilus yang merupakan batas dari sel absorpsi vilus tersebut. Pada waktu masuk ke batas ini, disakarida tersebut dihidrolisis, semua menghasilkan glukosa, di samping itu sukrosa menghasilkan juga fruktosa, dan laktosa menghasilkan galaktosa. Monosakarida ini juga diabsorpsi oleh sel-sel absorpsi, tetapi mekanisme transport aktifnya belum dapat dipastikan. Sebagian besar penyerapan merupakan suatu proses aktif dan bukan sekedar suatu proses yang pasif. Hal ini diperlihatkan dari kemampuan sel-sel epitel untuk menyerap secara selektif zat-zat seperti glukosa, galaktosa dan fruktosa dalam konsentrasi yang tidak sama. Glukosa diserap lebih cepat dari fruktosa, sepanjang epitelnya masih hidup dan tidak rusak. Akan tetapi, setelah unggas mati, ke tiga macam gula sederhana itu akan melintasi mukosa dengan kecepatan yang sama, karena yang bekerja hanyalah kekuatan fisik dalam bentuk penyerapan pasif.

Glikogen suatu karbohidrat khas hewan, berfungsi sebagai simpanan jangka pendek, yang dapat dipergunakan secara cepat jika gula yang tersedia dalam darah atau tempat lain telah habis. Glikogen dapat disimpan dalam kebanyakan sel, terutama dalam sel-sel hati dan otot. Pada waktu darah dari saluran pencernaan melewati hati, kelebihan gula yang diserap dari usus diambil oleh sel hati dan diubah menjadi glikogen. Insulin yang dihasilkan oleh kelompok sel-sel endokrin pankreas, yaitu pulau Langerhans, mengontrol pengambilan glukosa oleh sel-sel dan sintesis glikogen. Peningkatan gula dalam darah merangsang sel-sel pankreas untuk memproduksi insulin. Insulin diangkut melalui darah ke seluruh tubuh tempat hormon ini merangsang sintesis glikogen dalam sel otot dan hati. Reaksi kebalikannya, yaitu perombakan glikogen menjadi glukosa diatur oleh enzim pankreas, glukagon, dan oleh epinefrin. Tetapi sel-sel otot tidak mempunyai enzim untuk mengubah glukosa-6-fosfat menjadi glukosa, sehingga glikogen otot hanya dapat dipergunakan sebagai penimbunan energi untuk sel otot.

Setelah proses penyerapan melalui dinding usus halus, sebagian besar monosakarida dibawa oleh aliran darah ke hati. Di dalam hati, monosakarida mengalami proses sintesis menghasilkan glikogen, oksidasi menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ , atau dilepaskan untuk dibawa dengan aliran darah ke bagian tubuh yang memerlukannya. Sebagian lain, monosakarida dibawa langsung ke sel jaringan organ tertentu dan mengalami proses metabolisme lebih lanjut.

### 2.2.3. Metabolisme energi dari karbohidrat

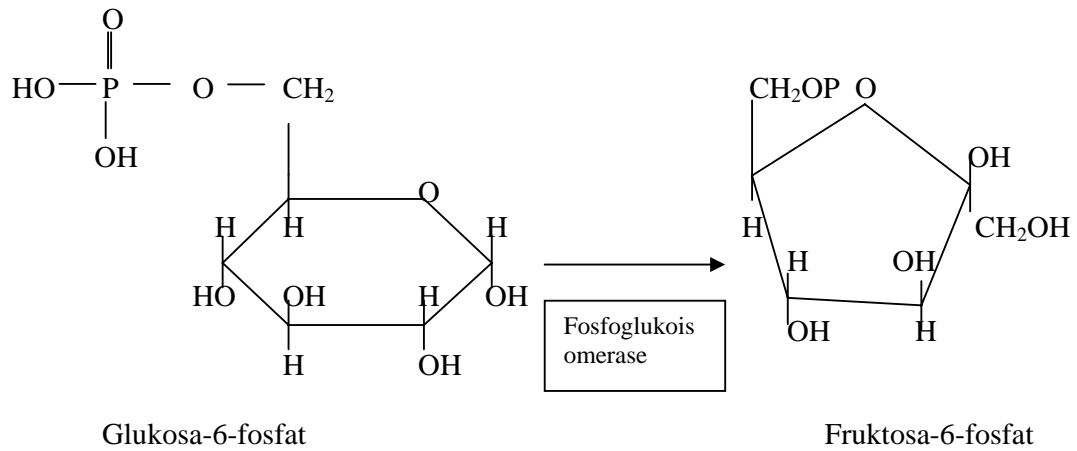
Metabolisme karbohidrat untuk menghasilkan energi dimulai dari masuknya glukosa dari darah ke dalam sel. Di sitosol sel terjadilah proses glikolisis tahap pertama yang dimulai dengan reaksi antara glukosa dengan ATP (*adenosine tri phosphate*) dengan adanya enzim glukokinase (yang memerlukan ion  $\text{Mg}^{2+}$  sebagai kofaktor) dalam rangka melakukan fosforilasi (pemasukan satu gugus fosfat) glukosa menjadi glukosa-6-fosfat, dengan menghasilkan ADP (*adenosine di phosphate*). Reaksi glikolisis tahap pertama dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2. Reaksi perubahan glukosa menjadi glukosa-6-fosfat**

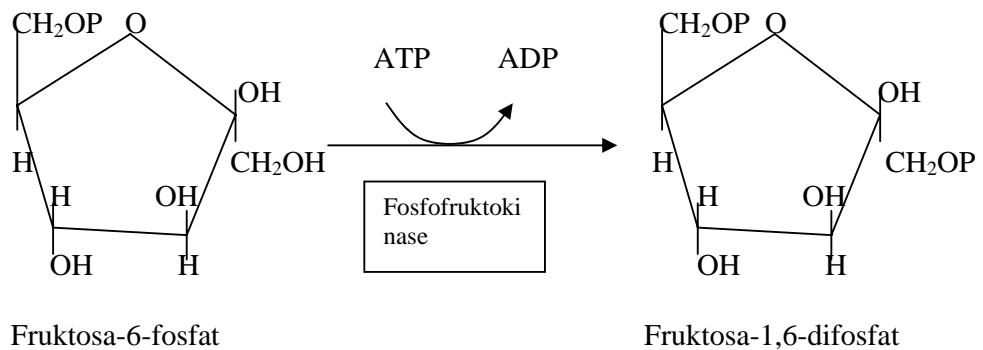
Reaksi tahap ke dua merupakan isomerisasi glukosa-6-fosfat diubah menjadi fruktosa-6-fosfat, yang dikatalisis oleh fosfoheksoisomerase. Dalam reaksi ini tidak terjadi penguraian maupun pembentukan ATP (Gambar 2.3)





**Gambar 2.3. Reaksi glukosa-6-fosfat menjadi fruktosa-6-fosfat**

Reaksi tahap ke tiga adalah pemasukan gugus fosfat dari ATP, dikatalisis oleh fosfofruktokinase dengan ion  $Mg^{2+}$  sebagai kofaktor dan terbentuklah fruktosa-1,6-difosfat dengan meninggalkan lagi ADP (Gambar 2.4).

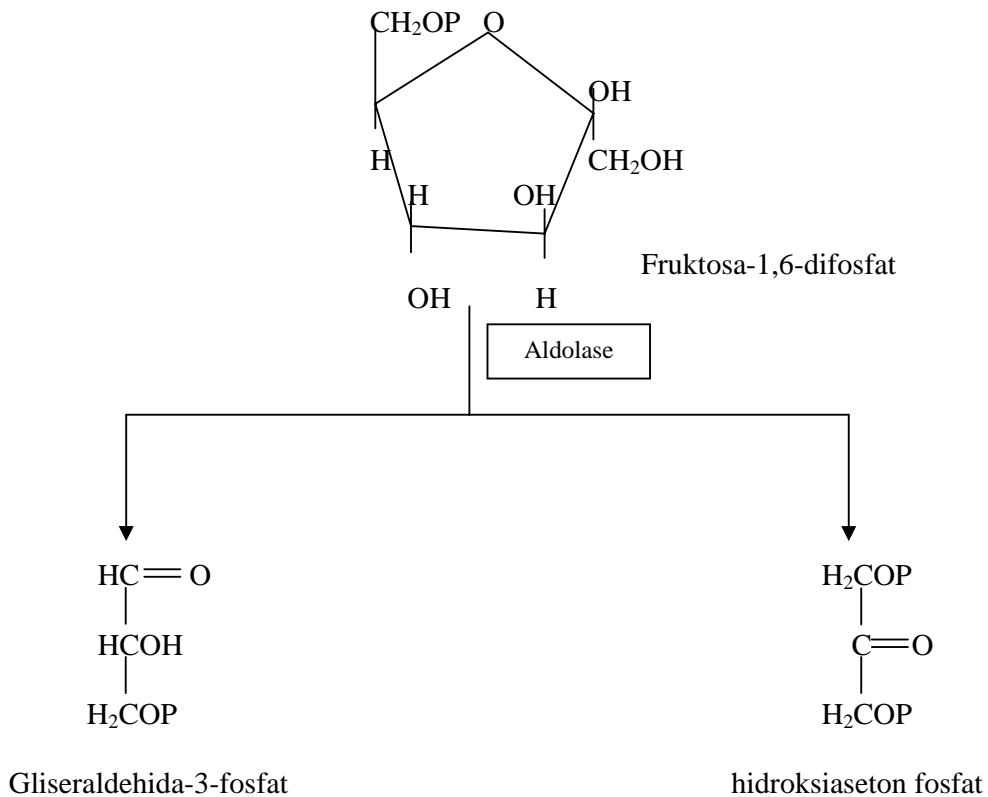


**Gambar 2.4. Reaksi fruktosa-6-fosfat menjadi fruktosa-1,6-difosfat**

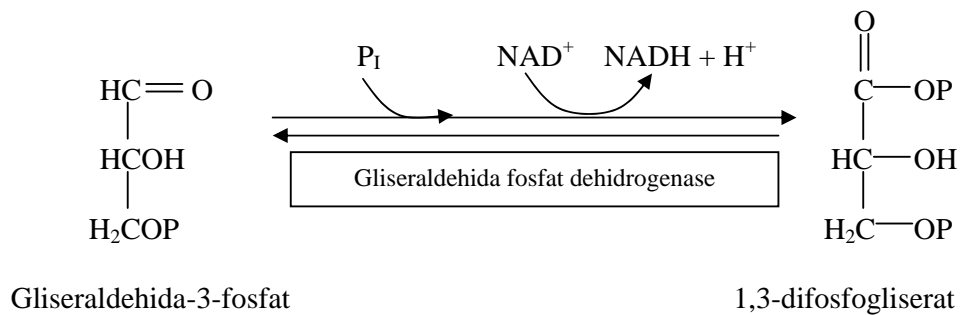
Reaksi tahap ke empat merupakan pemecahan senyawa karbohidrat berat enam menjadi dua senyawa berat tiga. Fruktosa-1,6-difosfat dengan bantuan enzim aldolase, dipecah menjadi dua molekul triosa fosfat yaitu 3, gliseraldehida 3-fosfat dan dihidroksiaseton fosfat. Selanjutnya terjadi reaksi isomerisasi bolak-balik antara ke dua senyawa berat tiga ini yang dikatalisis oleh triosafosfat isomerase. Dalam keadaan normal dihidroksiaseton fosfat

diubah seluruhnya menjadi gliseraldehida 3-fosfat sehingga kemungkinan kehilangan setengah dari energi molekul glukosa dapat dicegah. Dapat dikatakan di sini, pemecahan satu molekul fruktosa 1,6-fosfat menghasilkan dua molekul gliseraldehida 3-fosfat. Tahap-tahap reaksi satu sampai empat memerlukan energi dan gugus fosfat dari penguraian ATP menjadi ADP (Gambar 2.5).

Reaksi tahap ke lima merupakan perubahan gliseraldehida 3-fosfat menjadi asam 1,3-difosfoglisarat, yang melibatkan reaksi pemasukan satu gugus fosfat dari asam fosfat (bukan dari ATP) dan oksidasi molekul aldehida menghasilkan molekul asam karboksilat. Reaksi ini dikatalisis oleh gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase dan dirangkaikan dengan reaksi reduksi pembentukan NADH (bentuk reduksi dari nikotinamid adenin dinukleotida) dari  $\text{NAD}^+$  (bentuk oksidasinya). Reaksi tahap ke lima dalam tahap glikolisis merupakan reaksi pertama yang menghasilkan energi (Gambar 2.6).

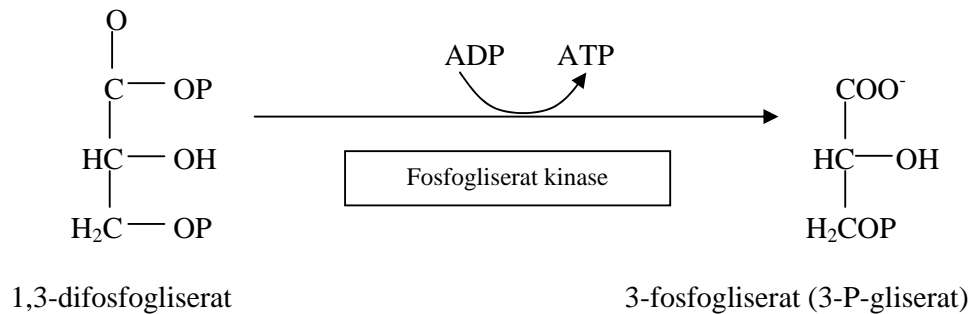


**Gambar 2.5. Reaksi fruktosa 1,6-fosfat menjadi gliseraldehida 3-fosfat dan dihidroksiaseton fosfat**



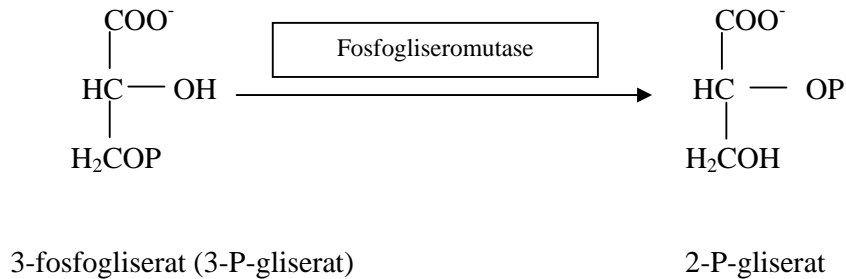
**Gambar 3.6. Reaksi gliseraldehida 3-fosfat menjadi asam 1,3-difosfogliserat**

Tahap ke enam, satu dari dua buah ikatan antara asam fosfat dengan asam gliserat dalam molekul asam 1,3-difosfogliserat adalah suatu ikatan anhidrida yang dalam proses pemecahannya menghasilkan energi untuk pembentukan ATP dari ADP dan Pi. Reaksi ini dikatalisis oleh fosfogliserat kinase (dengan ion magnesium sebagai kofaktor) dengan menghasilkan asam 3-fosfogliserat (Gambar 2.7).



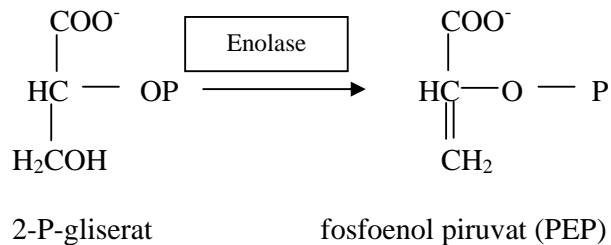
**Gambar 2.7. Reaksi 1,3-difosfogliserat menjadi 3-fosfogliserat (3-P-gliserat)**

Reaksi tahap ke tujuh adalah isomerisasi asam gliserat 3-fosfat menjadi asam gliserat 2-fosfat, dikatalisis oleh fosfogliserat mutase dengan ion magnesium atau ion mangan sebagai kofaktor (Gambar 2.8).



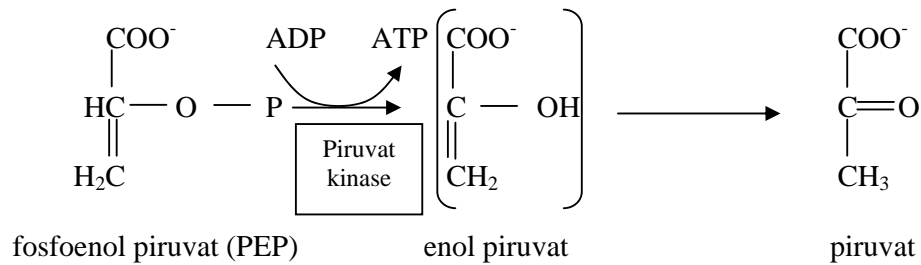
**Gambar 2.8. Reaksi asam gliserat 3-fosfat menjadi asam gliserat 2-fosfat**

Reaksi tahap ke delapan adalah enzim enolase melepaskan satu molekul H<sub>2</sub>O dari asam gliserat 2-fosfat menghasilkan asam fosfoenolpiruvat dengan ion magnesium atau ion mangan sebagai kofaktor (Gambar 2.9).



**Gambar 2.9. Reaksi asam gliserat 2-fosfat menjadi asam fosfoenolpiruvat**

Reaksi tahap ke sembilan atau terakhir dari glikolisis adalah pembentukan asam piruvat dari asam fosfoenolpiruvat melalui senyawa antara asam enolpiruvat. Dalam reaksi yang dikatalisis oleh piruvat kinase (ion magnesium sebagai kofaktor) gugus fosfat yang dilepaskan oleh fosfoenolpiruvat dipakai untuk mensintesis ATP dari ADP. Perubahan enolpiruvat ke asam piruvat terjadi secara spontan (Gambar 2.10).



**Gambar 2.10. Reaksi pembentukan asam piruvat dari asam fosfoenolpiruvat**

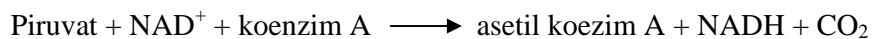
Tahapan glikolisis secara menyeluruh dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama meliputi tahap reaksi enzim yang memerlukan ATP, yaitu tahap reaksi dari glukosa sampai dengan pembentukan fruktosa 6-fosfat, yang menggunakan dua molekul ATP untuk tiap satu molekul glukosa yang dioksidasi. Bagian ke dua meliputi tahap reaksi yang menghasilkan energi (ATP dan NADH), yaitu dari gliseraldehida 3-fosfat sampai dengan piruvat. Dari bagian ke dua ini dihasilkan dua molekul NADH dan empat molekul ATP untuk tiap molekul glukosa yang dioksidasi (atau untuk dua molekul gliseraldehida 3-fosfat yang dioksidasi). Karena satu molekul NADH yang masuk rantai transport elektron dapat menghasilkan tiga molekul ATP, maka tahap reaksi bagian ke dua ini menghasilkan 10 molekul ATP. Dengan demikian keseluruhan proses glikolisis menghasilkan  $10 - 2 = 8$  molekul ATP untuk tiap molekul glukosa yang dioksidasi. Secara keseluruhan tahap glikolisis dapat dilihat pada Gambar 2.11.

Selanjutnya asam piruvat diubah melalui salah satu jalur berikut ini.

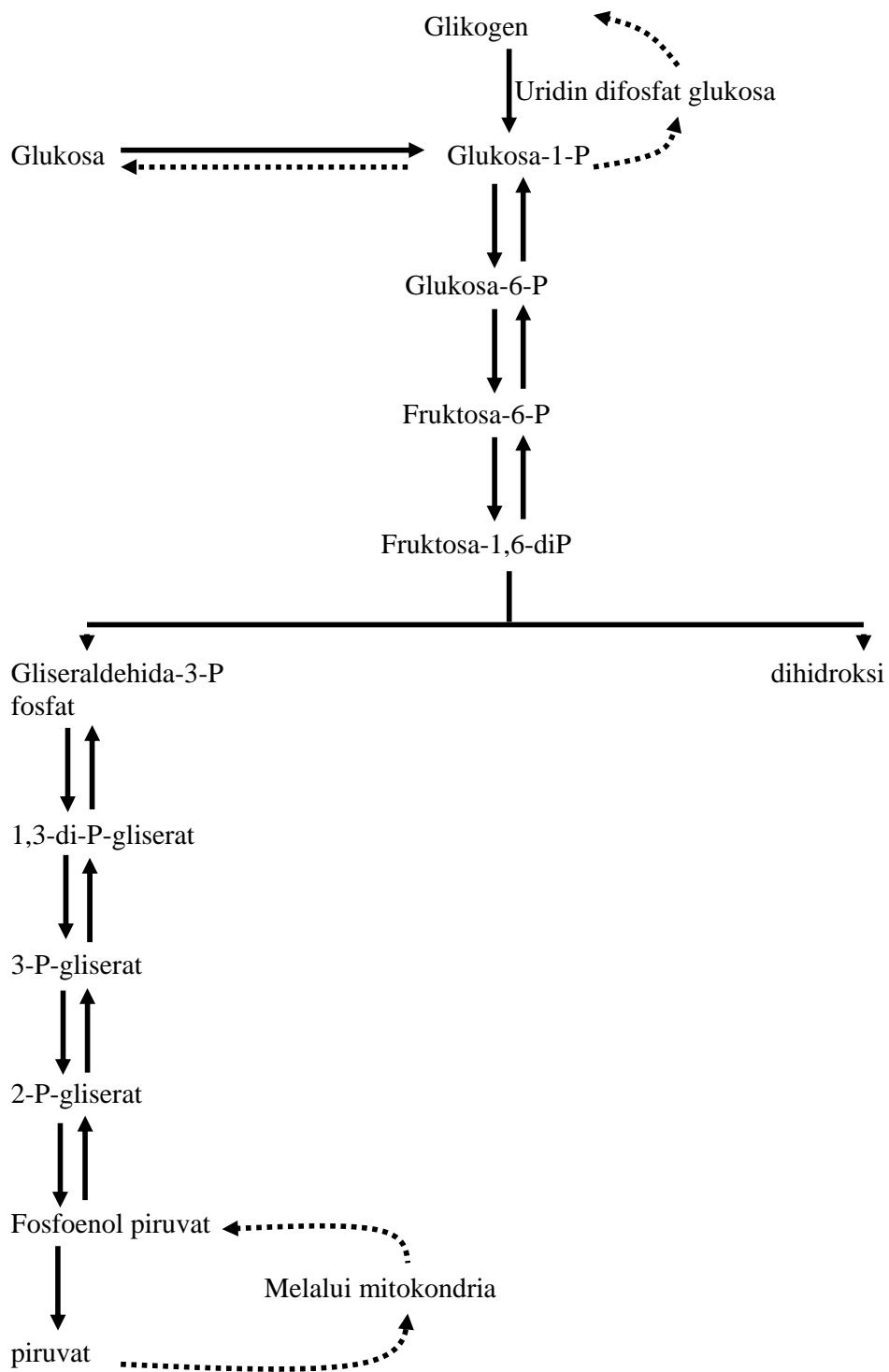
1. Dapat masuk ke mitokondria dan kemudian ikut dalam siklus asam trikarboksilat (siklus asam sitrat, siklus Krebs) untuk melakukan oksidasi dan fosforilasi ADP menjadi ATP dalam sistem sitokrom (ini adalah jalur yang paling sering terjadi pada asam piruvat).
2. Dapat direduksi membentuk asam laktat dan bersifat reversibel.
3. Dapat diubah kembali menjadi karbohidrat melalui glikoneogenesis (kebalikan dari glikolisis).
4. Dapat direduksi kembali menjadi asam malat lalu masuk dalam siklus Krebs.
5. Dapat dioksidasi menjadi asam oksaloasetat dalam siklus Krebs.

6. Dapat diubah menjadi asam amino alanin melalui transaminasi.

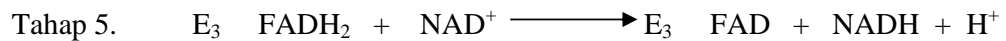
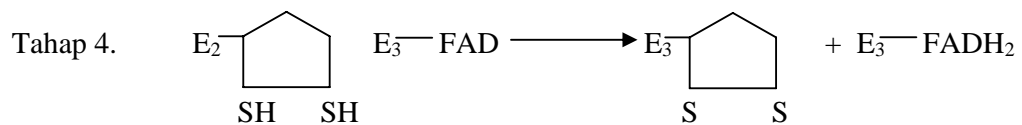
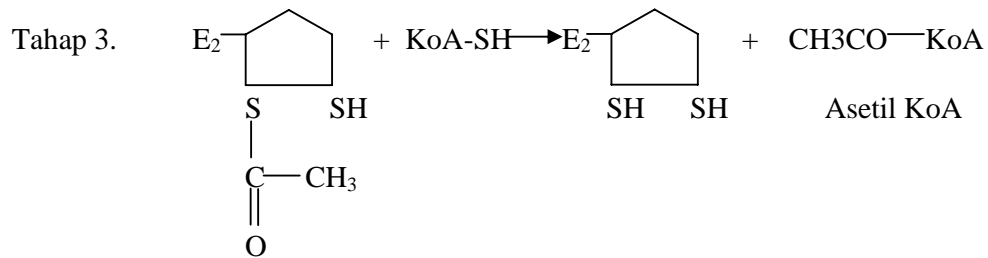
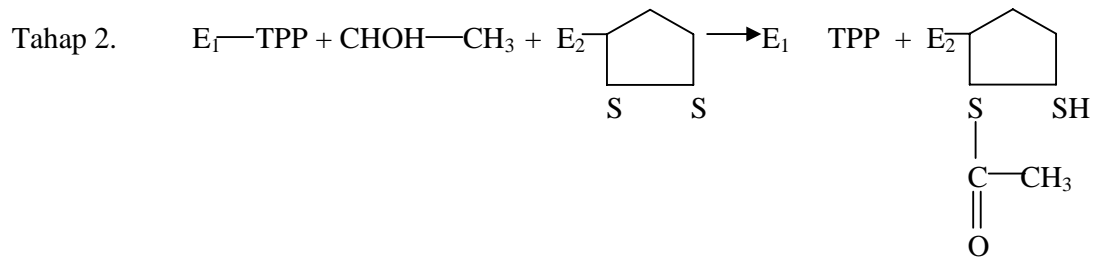
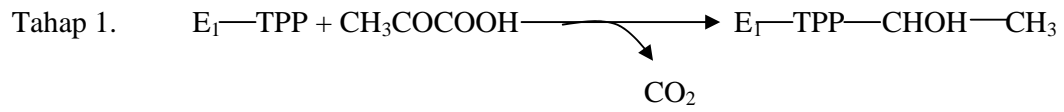
Hal ini semua adalah jalur yang mungkin dijalani oleh asam piruvat, dan ini bergantung pada metabolisme sel waktu itu. Selama proses glikolisis, setiap molekul glukosa membentuk dua molekul asam piruvat yang seluruhnya terjadi di sitosol sel. Reaksi oksidasi piruvat hasil glikolisis menjadi asetil koenzim A merupakan tahap reaksi penghubung yang penting antara glikolisis dengan jalur metabolisme siklus asam trikarboksilat (siklus Krebs). Reaksi yang dikatalisis oleh kompleks piruvat dehidrogenase dalam matriks mitokondria melibatkan tiga macam enzim (piruvat dehidrogenase, dihidrolipoil transasetilase dan dihidrolipoil dehidrogenase), lima macam koenzim (tiaminpirofosfat, asam lipoat, koenzim A, flavin adenin dinukleotida dan nikotinamid adenin dinukleotida), dan berlangsung dalam lima tahap reaksi



Tahap reaksi pertama dikatalisis oleh piruvat dehidrogenase yang menggunakan tiamin pirofosfat sebagai koenzimnya. Dekarboksilasi piruvat menghasilkan senyawa  $\alpha$ -hidroksietil yang terikat pada gugus cincin tiazol dari tiamin pirofosfat. Pada tahap reaksi ke dua,  $\alpha$ -hidroksietil didehidrogenase menjadi asetil yang kemudian dipindahkan dari tiamin pirofosfat ke atom S dari koenzim yang berikutnya, yaitu asam lipoat, yang terikat pada enzim dihidrolipoil transasetilase. Dalam hal ini gugus disulfida dari asam lipoat diubah menjadi bentuk reduksinya, yaitu gugus sulfhidril. Pada tahap reaksi ke tiga, gugus asetil dipindahkan dengan perantaraan enzim dari gugus lipoil pada asam dihidrolipoat, ke gugus tiol (sulfhidril pada koenzim A). Kemudian asetil koezim A dibebaskan dari sistem kompleks enzim piruvat dehidrogenase. Pada tahap reaksi ke empat, gugus ditiol pada gugus lipoil yang terikat pada dihidrolipoil transasetilase dioksidasi kembali menjadi bentuk disulfidanya dengan enzim dihidrolipoil dehidrogenase yang berikatan dengan FAD (*flavin adenin dinukleotida*). Pada tahap ke lima atau terakhir, FADH<sub>2</sub> (bentuk reduksi dari FAD) yang tetap terikat pada enzim, dioksidasi kembali oleh NAD<sup>+</sup> (*nikotinamid adenin dinukleotida*) menjadi FAD, sedangkan NAD<sup>+</sup> berubah menjadi NADH (bentuk reduksi dari NAD<sup>+</sup>) (Gambar 2.12).



**Gambar 2.11. Tahapan glikolisis**



**Gambar 2.12. Tahap reaksi pembentukan asetil koenzim A dari piruvat**

Siklus Krebs terjadi di dalam mitokondria dan membutuhkan oksigen agar dapat berlangsung. Asam piruvat yang berasal dari glikolisis, begitu masuk ke dalam mitokondria diubah menjadi asetil koenzim A. Kemudian bersamaan

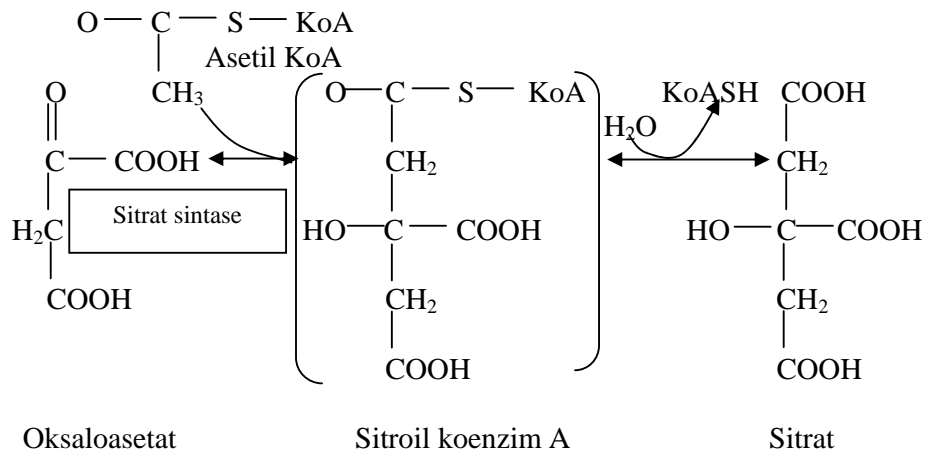


dengan berlangsungnya proses oksidasi dalam siklus Krebs, pasangan-pasangan atom hidrogen ( $2H$ ) dilepaskan bersama dengan  $CO_2$ . Atom-atom hidrogen tersebut menyajikan ion  $H^+$  atau proton dan elektron yang kemudian masuk ke dalam sistem transport elektron mitokondria. Ion hidrogen dan elektron ditangkap oleh molekul  $NAD^+$  (nikotinamid adenin dinukleotid), mereduksi  $NAD^+$  menjadi NADH. NADH merupakan pengantar siklus Krebs dan enzim dalam membran dalam mitokondria yang akan mengangkut elektron melalui sistem sitokrom dari rantai respirasi.

NADH memindahkan proton dan elektron dan terbentuklah FMN (*flavin mononukleotida*). Kemudian menurut teori kemiosmotik, FMN mengambil proton dari bagian dalam membran, hingga tereduksi menjadi  $FMNH_2$ . Kemudian dua atom H-nya dilepaskan dan ditransfer ke membran mitokondria eksterior dan dilepas berupa proton ( $H^+$ ). Pada saat yang sama, dua elektron itu menggabung ke molekul ubiquinon atau koenzim Q, yang kemudian mengambil atom-atom H. Kemudian dilepaskanlah satu elektron ke sitokrom  $C_1$  dan lainnya ke sitokrom b dari membran mitokondria. Elektron-elektron kemudian ditransfer ke sitokrom a dan  $a_3$ , dari sinilah elektron bergabung dengan atom oksigen dan dua proton untuk membentuk molekul air.

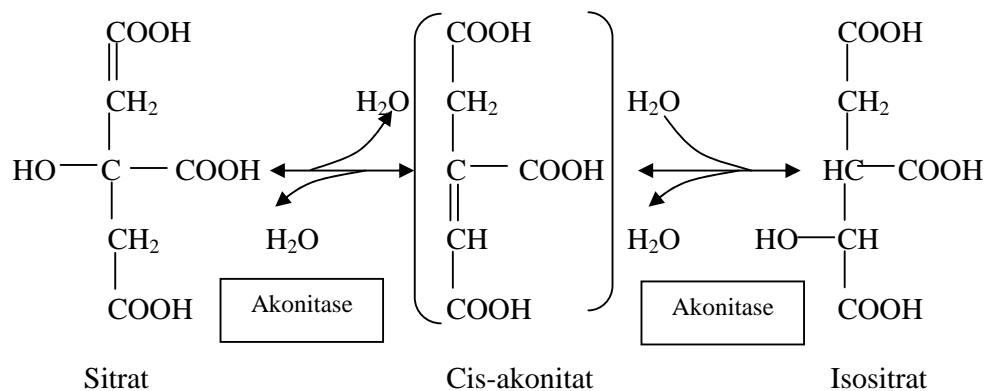
Dalam urutan oksidasi reduksi yang terjadi di dalam membran serta melintas membran mitokondria, tiap dua proton yang melintas membran dan masuk, akan menyebabkan fosfat anorganik melekat pada ADP karena adanya perbedaan potensial listrik, lalu terbentuklah ATP. Kecepatan reaksi ini akan meningkat oleh adanya sistem enzim.

Secara lebih terperinci, tahap-tahap reaksi pada siklus Krebs dapat diuraikan pada bagian berikut ini. Pada tahap pertama, enzim sitrat sintetase mengkatalisis reaksi kondensasi antara asetil koenzim A dengan oksaloasetat menghasilkan sitrat. Reaksi ini merupakan suatu reaksi kondensasi aldol antara gugus metil dari asetil koenzim A dan gugus karbonil dari oksaloasetat di mana terjadi hidrolisis ikatan tioester dan pembentukan senyawa koenzim A bebas (Gambar 2.13).



**Gambar 2.13.** Reaksi enzim sitrat sintase mengkatalisis reaksi kondensasi antara asetil koenzim A dengan oksaloasetat yang menghasilkan sitrat

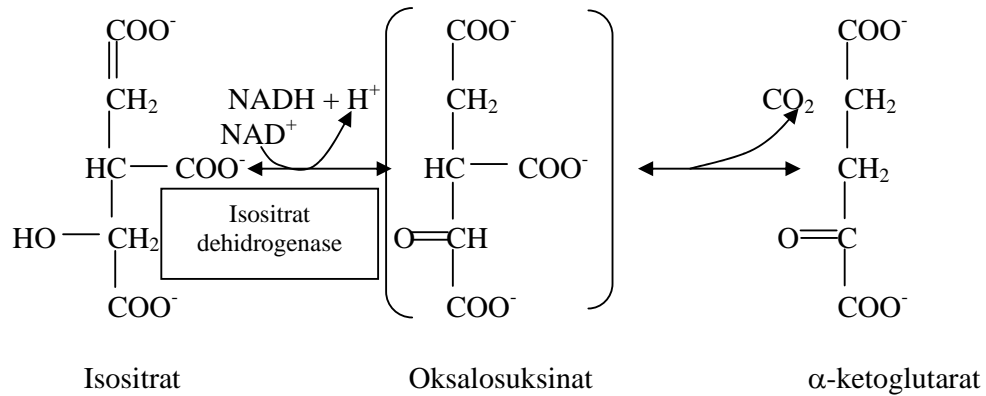
Tahap reaksi ke dua merupakan pembentukan isositrat dari sitrat melalui cis-akonitat yang dikatalisis secara reversibel (dapat balik) oleh enzim akonitase. Enzim ini mengkatalisis reaksi reversibel penambahan H<sub>2</sub>O pada ikatan rangkap cis-akonitat dalam dua arah, yang satu ke pembentukan sitrat dan yang lain ke pembentukan isositrat (Gambar 2.14).



**Gambar 2.14.** Reaksi pembentukan isositrat dari sitrat melalui cis-akonitat

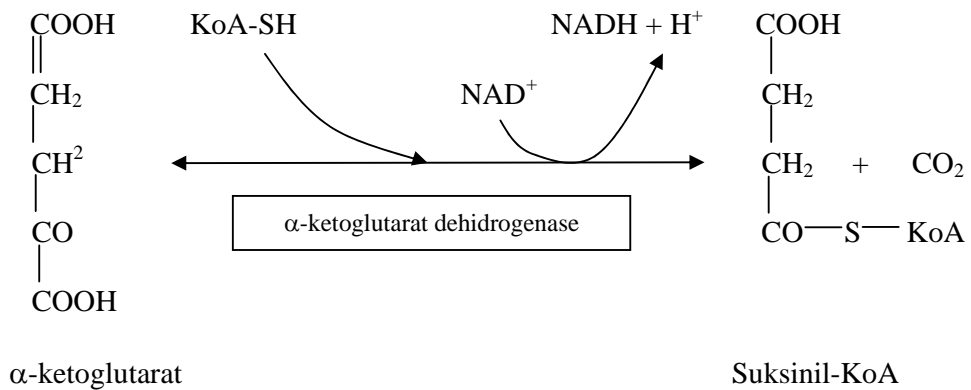
Reaksi tahap ke tiga adalah oksidasi isositrat menjadi α-ketoglutarat yang berlangsung melalui pembentukan senyawa antara oksalosuksinat yang berikatan

dengan enzim isositrat dehidrogenase dengan NAD berperan sebagai koenzimnya (Gambar 2.15).



**Gambar 2.15. Reaksi oksidasi isositrat menjadi  $\alpha$ -ketoglutarat**

Tahap reaksi ke empat adalah oksidasi  $\alpha$ -ketoglutarat menjadi suksinat melalui pembentukan suksinil koenzim A. Pembentukan suksinil koenzim A dari  $\alpha$ -ketoglutarat adalah reaksi yang irreversibel dan dikatalisis oleh enzim kompleks  $\alpha$ -ketoglutarat dehidrogenase. Reaksi ini berlangsung dengan melibatkan koenzim pirofosfat, asam lipoat, koenzim A, FAD dan  $\text{NAD}^+$  (Gambar 2.16).

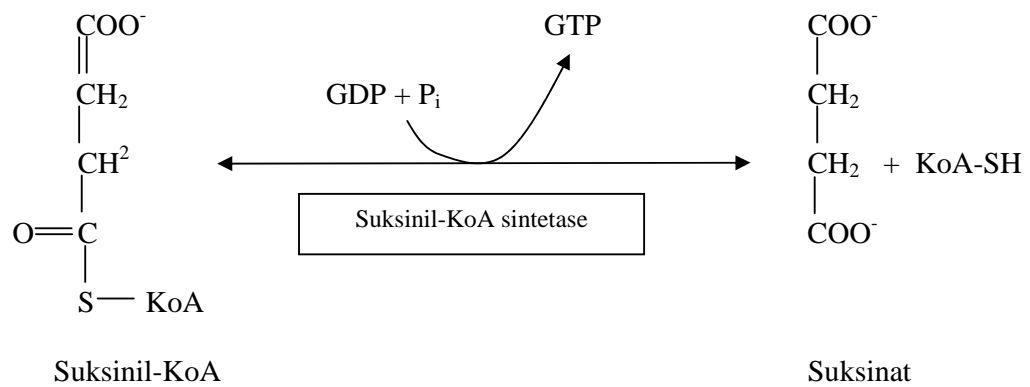


**Gambar 2.16. Reaksi oksidasi  $\alpha$ -ketoglutarat menjadi suksinat**

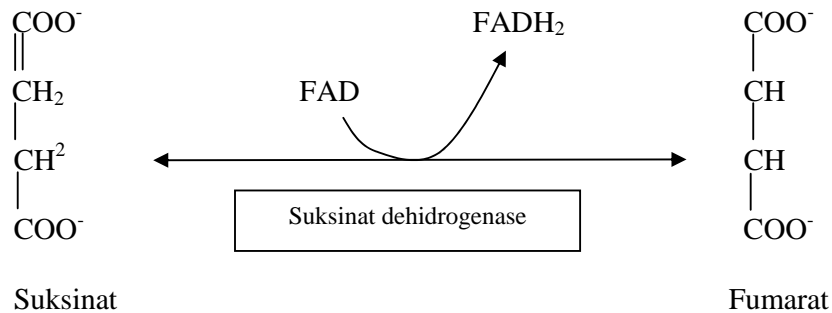
Suksinil koenzim A adalah suatu senyawa tioester berenergi tinggi. Selanjutnya suksinil koenzim A melepaskan koenzim A-nya, dirangkaikan dengan reaksi pembentukan energi, GTP (guanosa trifosfat) dari GDP (guanosa difosfat)

dan fosfat. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim suksinil koenzim A sintetase yang khas untuk GDP. Selanjutnya GTP yang terbentuk dari reaksi ini digunakan untuk sintesis ATP dari ADP dengan enzim nukleotide difosfat kinase (Gambar 2.17).

Pada reaksi tahap ke lima, suksinat dioksidasi menjadi fumarat oleh enzim suksinat dehidrogenase yang berikatan dengan FAD sebagai koenzimnya. Enzim ini terikat kuat pada membran dalam mitokondria. Dalam reaksi ini FAD berperan sebagai gugus penerima hidrogen (Gambar 2.18).



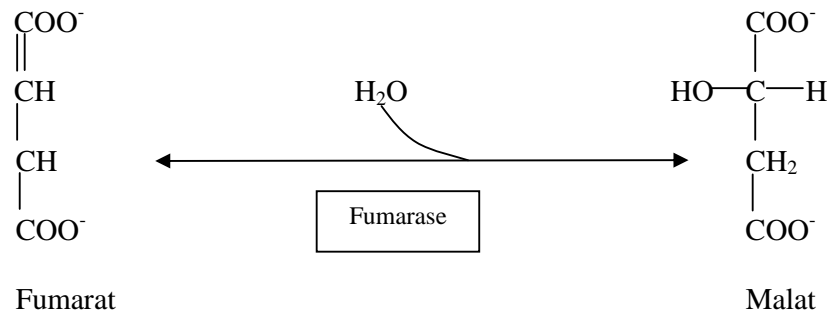
**Gambar 2.17. Reaksi pembentukan suksinat dari suksinil koenzim A**



**Gambar 2.18. Reaksi suksinat dioksidasi menjadi fumarat**

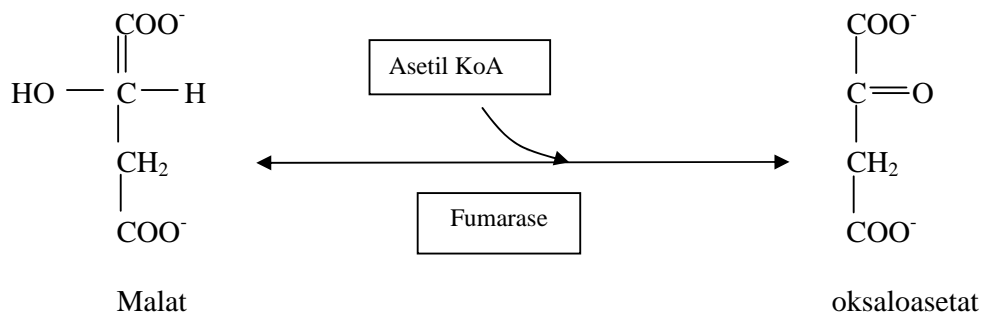
Reaksi tahap ke enam merupakan reaksi reversibel penambahan satu molekul H<sub>2</sub>O ke ikatan rangkap fumarat yang menghasilkan L-malat dengan dikatalisis oleh enzim fumarase tanpa koenzim. Enzim ini bersifat stereospesifik,

bertindak hanya terhadap bentuk L-stereoisomer dari malat. Dalam reaksi ini fumarase mengkatalisis proses penambahan trans atom H dan gugus OH ke ikatan rangkap fumarat (Gambar 2.19).



**Gambar 2.19. Reaksi fumarat yang menghasilkan L-malat**

Reaksi tahap ke tujuh atau terakhir adalah L-malat dioksidasi menjadi oksaloasetat oleh enzim L-malat dehidrogenase yang berikatan dengan NAD. Reaksi ini adalah endergonik tetapi laju reaksinya berjalan lancar ke kanan. Hal ini dimungkinkan karena reaksi berikutnya, yaitu reaksi kondensasi oksaloasetat dengan asetil koenzim A adalah reaksi eksergonik yang irreversibel. Malat dehidrogenase adalah enzim yang bersifat stereospesifik untuk bentuk L-stereoisomer dari malat (Gambar 2.20).



**Gambar 2.20. Reaksi L-malat dioksidasi menjadi oksaloasetat**

Hasil neto dari siklus Krebs serta sistem transport sitokrom adalah untuk menghasilkan tiga ATP dari ADP untuk tiap pasang atom H yang dilepaskan selama siklus tersebut, dan hal ini terjadi melalui fosforilasi oksidatif. Di sini juga dihasilkan tiga molekul CO<sub>2</sub> dan tiga molekul H<sub>2</sub>O.

Karena ada dua molekul piruvat yang terbentuk dari tiap molekul glukosa, siklus Krebs bekerja dua kali untuk tiap molekul glukosa yang dipecahkan. Oleh karena itu, pada dasarnya akan diperoleh empat pasang atom hidrogen untuk tiap siklus. Dua siklus akan menghasilkan  $8 \times 3 = 24$  ATP, dan dua ATP neto dari glikolisis, ditambah empat ATP lagi dari pembentuk FAD yang tereduksi selama siklus Krebs. Di samping itu juga dua lagi ATP dari fosforilasi oksidatif pada tingkat substrat, yang kesemuanya menjadi 32 ATP, enam lagi masih mungkin dari generasi glikolitik dari NADH.

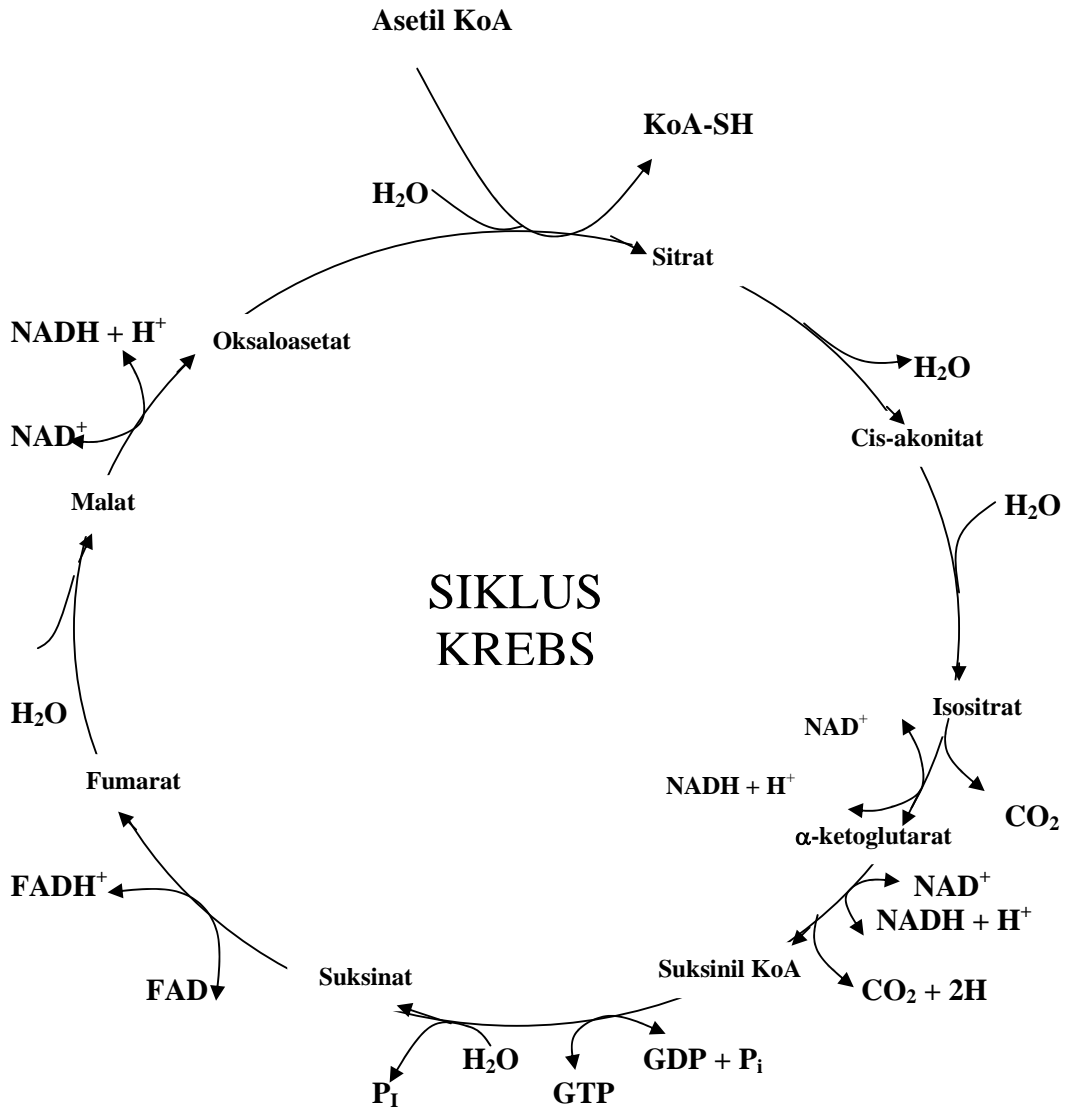
Jadi dapat dinyatakan 38 molekul ATP dihasilkan dari degradasi satu molekul glukosa. ATP yang terbentuk itu merupakan sumber energi yang siap untuk tiap kegiatan biologi termasuk kontraksi otot, sekresi kelenjar, konduksi saraf, transport aktif dan transport membran. Secara keseluruhan siklus Krebs dapat dilihat pada Gambar 2.21.

Piruvat, dengan adanya NADH,  $H^+$  dan enzim laktat dehidrogenase, membentuk laktat dan NAD. Dengan perubahan yang bersifat enzimatis, laktat kemudian dikonversikan kembali menjadi piruvat yang kemudian masuk siklus Krebs untuk oksidasi lengkap seperti yang telah dikemukakan sebelumnya. Hasil akhirnya selalu  $CO_2$ ,  $H_2O$  dan energi yang siap digunakan dalam bentuk ATP. Secara keseluruhan metabolisme karbohidrat dapat dilihat pada Gambar 2.22.

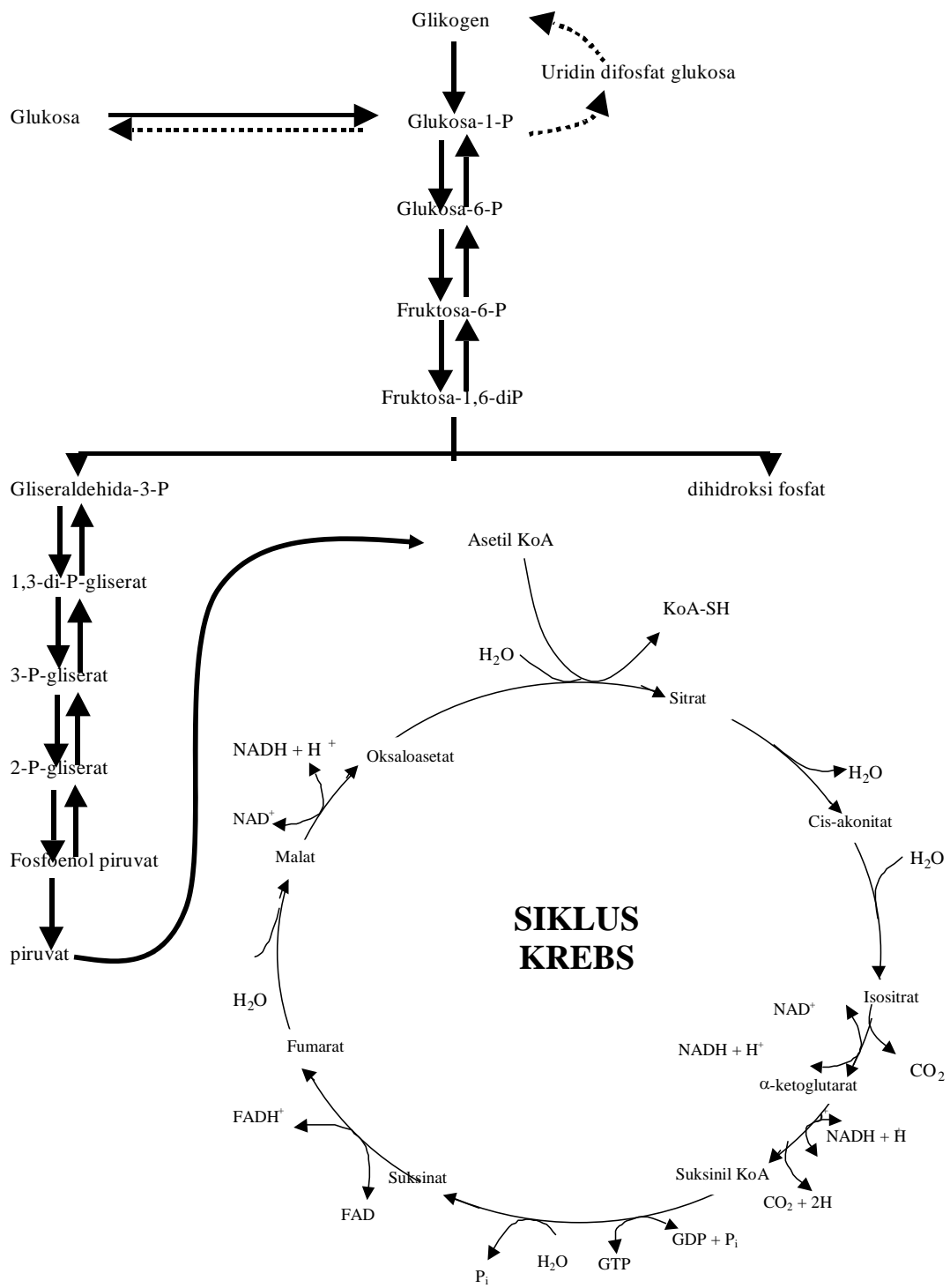
Sebagian dari glukosa yang masuk ke dalam sel tidak mengalami katabolisme menjadi piruvat oleh glikolisis, tetapi membentuk glikogen secara anabolis melalui proses yang disebut glikogenesis, sehingga glukosa untuk sementara dapat disimpan dalam hati. Proses ini kemudian diikuti oleh proses kebalikannya, yaitu glikogenolisis yang merupakan pemecahan cadangan glikogen menjadi glukosa-6-fosfat pada beberapa sel (misalnya otot), atau langsung menjadi glukosa seperti yang terjadi di hati.

Glukosa tidaklah harus selalu masuk ke sel dari kapiler darah. Beberapa sel terutama sel hati, dapat menghasilkan glukosa dari substrat yang bukan karbohidrat. Hal ini adalah pembentukan glukosa dari sel-sel lemak atau protein di dalam hati, yang kemudian masuk ke dalam aliran darah, yang disebut dengan proses glukoneogenesis. Hal ini pada dasarnya terjadi ketika konsentrasi glukosa

darah menurun, atau ketika jumlah glukosa yang masuk ke dalam sel tidak mencukupi dan cadangan glikogen terpakai habis.



Gambar 2.21. Siklus Krebs



**Gambar 2.22. Metabolisme karbohidrat**



## **2.3. Energi dari Lemak**

### **2.3.1. Pengertian lemak**

Lemak adalah kelompok senyawa heterogen yang masih berkaitan, baik secara aktual maupun potensial dengan asam lemak. Lipid mempunyai sifat umum yang relatif tidak larut dalam air dan larut dalam pelarut non polar seperti eter, kloroform dan benzena. Dalam tubuh, lemak berfungsi sebagai sumber energi yang efisien secara langsung dan secara potensial bila disimpan dalam jaringan adiposa. Lemak berfungsi sebagai penyekat panas dalam jaringan subkutan dan sekeliling organ-organ tertentu, dan lipid non polar bekerja sebagai penyekat listrik yang memungkinkan perambatan cepat gelombang depolarisasi sepanjang syaraf bermielin.

Klasifikasi lemak terdiri atas : lemak sederhana, lemak campuran dan lemak turunan (derived lipid). Lemak sederhana adalah ester asam lemak dengan berbagai alkohol. Lemak sederhana terdiri atas lemak dan lilin. Lemak merupakan ester asam lemak dengan gliserol. Lemak dalam tingkat cairan dikenal sebagai minyak. Lilin (*waxes*) adalah ester asam lemak dengan alkohol monohidrat yang mempunyai berat molekul lebih besar.

Lipid campuran adalah ester asam lemak yang mengandung gugus tambahan selain alkohol dan asam lemak. Lipid campuran terdiri atas fosfolipid, glikolipid dan lipid campuran lain. Fosfolipid merupakan lipid yang mengandung residu asam fosfat sebagai tambahan asam lemak dan alkohol. Fosfolipid juga memiliki basa yang mengandung nitrogen dan pengganti (*substituen*) lain. Pada banyak fosfolipid, misalnya gliserofosfolipid, alkoholnya adalah gliserol, tetapi pada yang lain, misalnya sfingofosfolipid, alkoholnya adalah sfingosin. Glikolipid adalah campuran asam lemak dengan karbohidrat yang mengandung nitrogen tetapi tidak mengandung asam fosfat. Lipid campuran lain adalah sulfolipid dan aminolipid. Lipoprotein juga dapat ditempatkan dalam kategori ini.

Lemak turunan adalah zat yang diturunkan dari golongan-golongan di atas dengan hidrolisis. Ini termasuk asam lemak (jenuh dan tidak jenuh), gliserol, steroid, alkohol di samping gliserol dan sterol, aldehida lemak dan benda keton.

Gliserida (asil-gliserol), kolesterol dan ester kolesterol dinamakan lipid netral karena tidak bermuatan.

### 2.3.2. Pengertian asam lemak

Asam lemak adalah asam karboksilat yang diperoleh dari hidrolisis ester terutama gliserol dan kolesterol. Asam lemak yang terdapat di alam biasanya mengandung atom karbon genap (karena disintesis dari dua unit karbon) dan merupakan derivat berantai lurus. Rantai dapat jenuh (tidak mengandung ikatan rangkap) dan tidak jenuh (mengandung satu atau lebih ikatan rangkap).

Asam-asam lemak tidak jenuh mengandung jumlah atom hidrogen kurang dari dua kali atom karbon, serta satu atau lebih pasangan atom-atom karbon yang berdekatan dihubungkan oleh ikatan rangkap. Asam lemak tidak jenuh dapat dibagi menurut derajat ketidakjenuhannya, yaitu asam lemak tak jenuh tunggal (*monounsaturated, monoetenoid, monoenoat*), asam lemak tak jenuh banyak (*polyunsaturated, polietenoid, polienoat*) yang terjadi apabila beberapa pasang dari atom karbon yang berdekatan mengandung ikatan rangkap dan eikosanoat. Eikosanoat adalah senyawa yang berasal dari asam lemak eikosapolienoat, yang mencakup prostanoat dan leukotrien (LT). Prostanoat termasuk prostaglandin (PG), prostasiklin (PGI) dan tromboksan (TX). Istilah prostaglandin sering digunakan dengan longgar termasuk semua prostanoat. Contoh asal lemak tidak jenuh pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1. Asam-asam lemak tidak jenuh**

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Palmitoleat (heksadesenoat)	$C_{16}H_{30}O_2$	Cair
Oleat (oktadesenoat)	$C_{18}H_{34}O_2$	Cair
Linoleat (oktadekadienoat)	$C_{18}H_{32}O_2$	Cair
Linolenat (oktadekatrienoat)	$C_{18}H_{30}O_2$	Cair
Arakidonat (eikosatetrienoat)	$C_{20}H_{32}O_2$	Cair
Klupanodonat (dokosapentaenoat)	$C_{22}H_{34}O_2$	Cair

Asam lemak jenuh mempunyai atom hidrogen dua kali jumlah atom karbonnya, dan tiap molekulnya mengandung dua atom oksigen. Asam lemak jenuh mengandung semua atom hidrogen yang mungkin, dan atom karbon yang berdekatan dihubungkan oleh ikatan valensi tunggal. Asam lemak jenuh dapat dipandang berdasarkan asam asetat sebagai anggota pertama dari rangkaianannya. Anggota-anggota lebih tinggi lainnya dari rangkaian ini terdapat khususnya dalam lilin. Beberapa asam lemak berantai cabang juga telah diisolasi dari sumber tumbuh-tumbuhan dan binatang. Asam-asam lemak jenuh memiliki titik cair yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam yang tidak jenuh, untuk atom C yang sama banyaknya. Rantai asam lemak jenuh yang lebih panjang, titik cairnya lebih tinggi dibandingkan dengan yang rantainya lebih pendek. Contoh asam-asam lemak jenuh dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2. Asam-asam lemak jenuh**

<b>Asam-asam lemak</b>	<b>Formula</b>	<b>Titik cair (°C)</b>
Butirat (butanoat)	$C_4H_8O_2$	Cair
Kaproat (hexanoat)	$C_6H_{12}O_2$	Cair
Kaprilat (oktanoat)	$C_8H_{16}O_2$	16
Kaprat (dekanoat)	$C_{10}H_{20}O_2$	31
Laurat (dodekanoat)	$C_{12}H_{24}O_2$	44
Miristat (ttradekanoat)	$C_{14}H_{28}O_2$	54
Palmitat (heksadekanoat)	$C_{16}H_{32}O_2$	63
Stearat (oktadekanoat)	$C_{18}H_{36}O_2$	70
Arakidat (eikosanoat)	$C_{20}H_{40}O_2$	76
Lignoserat (ttrakosanoat)	$C_{24}H_{48}O_2$	86

### **2.3.3. Pencernaan dan penyerapan lemak**

Sebagian besar lemak dalam pakan adalah lemak netral (trigliserida), sedangkan selebihnya adalah fosfolipid dan kolesterol. Jika lemak masuk ke dalam duodenum, maka mukosa duodenum akan menghasilkan hormon enterogastrik, atau penghambat peptida pencernaan, yang pada waktu sampai di proventrikulus akan menghambat sekresi getah pencernaan dan memperlambat gerakan pengadukan. Hal ini tidak saja mencegah proventrikulus untuk mencerna lapisannya sendiri, tetapi juga memungkinkan lemak untuk tinggal lebih lama

dalam duodenum tempat zat tersebut dipecah oleh garam-garam empedu dan lipase.

Lemak yang diemulsikan oleh garam empedu dirombak oleh esterase yang memecah ikatan ester yang menghubungkan asam lemak dengan gliserol. Lipase, yang sebagian besar dihasilkan oleh pankreas, meskipun usus halus juga menghasilkan sedikit, merupakan esterase utama pada unggas. Garam-garam empedu mengemulsikan butir-butir lemak menjadi butir yang lebih kecil lagi, yang kemudian dipecah lagi oleh enzim lipase pankreatik menjadi digliserida, monogliserida, asam-asam lemak bebas (FFA = *free fatty acid*) dan gliserol. Garam-garam empedu kemudian merangsang timbulnya agregasi asam lemak bebas, monogliserida dan kolesterol menjadi misel (*micelle*), yang masing-masing mengandung ratusan molekul. Campuran garam empedu, asam lemak dan lemak yang sebagian telah tercerna, mengemulsikan lemak lebih lanjut menjadi partikel-partikel yang sebagian besar cukup kecil untuk diserap secara langsung.

Cairan empedu adalah suatu cairan garam berwarna kuning kehijauan yang mengandung kolesterol, fosfolipid lesitin, serta pigmen empedu. Garam-garam empedu (garam natrium dan kalium) dari asam glikokolat dan taurokolat adalah unsur-unsur terpenting dari cairan empedu, karena unsur-unsur itulah yang berperan dalam pencernaan dan penyerapan lemak. Triglisierida di dalam *chyme* (khim) duodenum cenderung untuk menggumpal bersama-sama sebagai kelompok atau gugus asam lemak berantai panjang yang tidak larut dalam air. Empedu juga membantu dalam penyerapan vitamin yang larut dalam lemak, serta membantu kerja lipase pankreas. Garam-garam empedu adalah garam-garam basa, oleh karena itu dapat membantu juga dalam menciptakan suasana yang lebih alkalis dalam khim usus halus agar absorpsi berlangsung dengan lancar. Komponen kolesterol dari cairan empedu berasal dari pembentukan di dalam hati maupun dari bahan yang dikonsumsi. Kolesterol tidak larut dalam air, tetapi garam-garam empedu dan lesitin dapat mengubahnya menjadi bentuk yang mudah larut sehingga kolesterol itu dapat berada di dalam cairan empedu.

Sekresi garam-garam empedu dari hati bergantung pada konsentrasi garam empedu yang terdapat di dalam darah yang melewati hati. Dengan peningkatan

konsentrasi dari garam-garam empedu dalam plasma yang terjadi selama pencernaan (karena garam-garam empedu diserap kembali dari usus halus ke vena porta hati kembali menuju ke hati), kemudian laju sekresi dari hati akan meningkat. Garam-garam empedu secara langsung merangsang sel-sel sekretoris. Sekresi larutan alkalis dari empedu bergantung pada sekresi gastrin dari daerah antral proventrikulus, dan bergantung juga pada laju sekresi kolesistokinin dan sekretin dari sel-sel mukosa duodenal. Sementara sekresi tersebut beredar di dalam darah selama mencerna makanan, meningkatlah sekresi larutan empedu dari hati akan meningkat.

Absorpsi lemak dan asam lemak merupakan masalah khusus, karena tidak seperti hasil akhir pencernaan, zat-zat ini tidak larut dalam air. Penyerapan zat ini dipermudah oleh kombinasi dengan garam empedu, karena kombinasi ini merupakan suatu kompleks (*misel/micelle*) yang larut dalam air. Garam empedu itu kemudian dibebaskan dalam sel mukosa dan dipergunakan lagi, dan asam lemak serta gliserol bersenyawa dengan fosfat untuk membentuk fosfolipid. Fosfolipid ini kemudian distabilisasi dengan protein dan dilepaskan dalam sistem getah bening sebagai globul-globul kecil yang disebut kilomikron yang kemudian di bawa ke aliran darah.

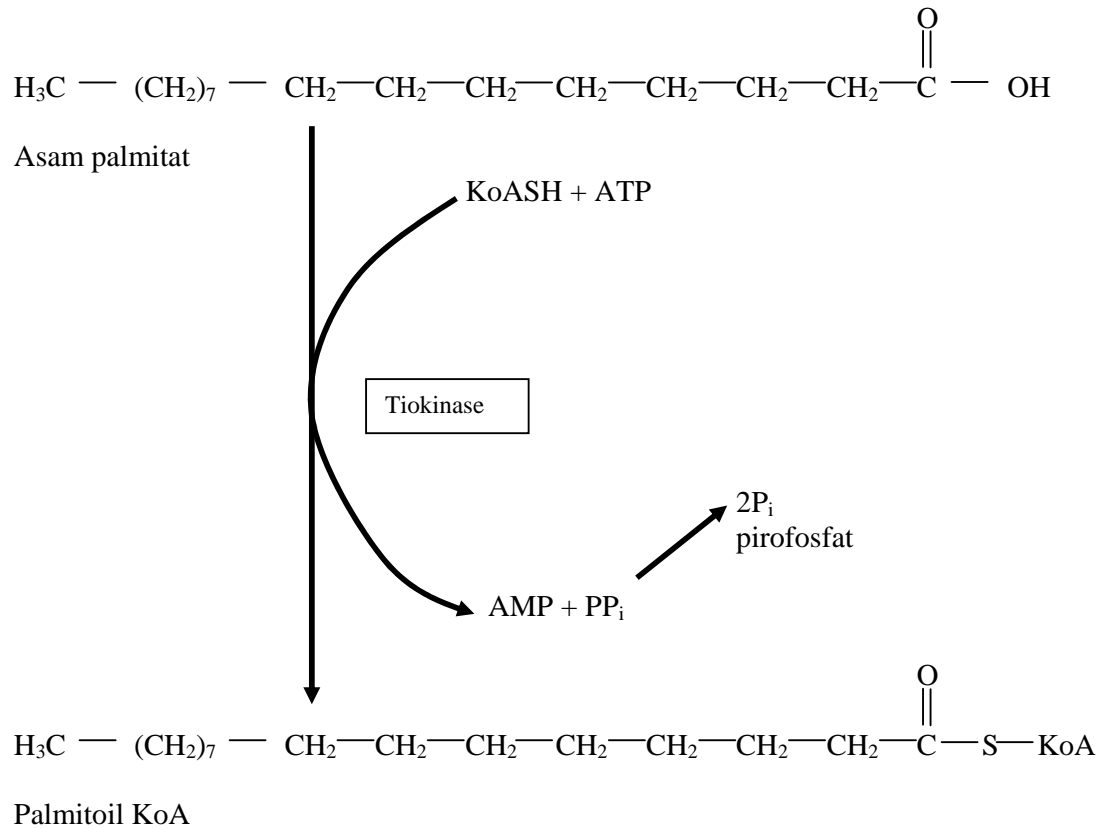
Ketika telah berada di dalam sel-sel epitel, terjadilah resintesis menjadi trigliserida, dan kemudian dilepaskan ke dalam limfatik lakteal melalui eksosisotis (kebalikan dari pinositosis). Lakteal merupakan pembuluh limfa yang menyerupai kapiler yang terdapat di dalam villi intestinal. Trigliserida masuk ke dalam lakteal sebagai kilomikron yang juga mengandung sejumlah kecil fosfolipid, kolesterol dan protein. Ini diantarkan dalam bentuk chyle menuju ke pembuluh limfa yang lebih besar. Akhirnya diteruskan ke sisterna chyli yang terletak di antara dua krura dari diafragma. Dari sisterna chyli, chyle bergerak melalui duktus torasik ke vena kava kranial atau ke vena jugular dekat pintu menuju ke vena kava dan ke sirkulasi vena. Bukti-bukti yang didapat secara biokimia dan penggunaan mikroskop elektron menunjukkan bahwa butir-butir kecil yang mengalami emulsifikasi dapat diserap secara pinositotik oleh sel-sel epitel dari usus dan masuk ke dalam lakteal dalam bentuk yang sama. Kira-kira

10 persen asam-asam lemak tidak mengalami rekonstitusi menjadi trigliserida di dalam sel-sel absorpsi epitel, tetapi sebaliknya bergerak langsung ke dalam darah portal bersama-sama dengan gliserol.

Dalam waktu dua atau tiga jam setelah absorpsi makanan berlemak, kilomikron lenyap dari dalam darah, beberapa diambil oleh sel hati, yang lain dicerna dalam aliran darah oleh lipoprotein lipase. Lipoprotein lipase dihasilkan dalam jumlah besar oleh depo lemak dalam tubuh dan diperkirakan bahwa sebagian besar dari lemak yang dihidrolisis secara cepat diabsorpsi dan disusun kembali oleh jaringan ini. Lemak yang ditimbun dalam hati atau jaringan adiposa senantiasa mengalami perombakan dan resintesis, meskipun jumlah keseluruhan yang disimpan hanya berubah sedikit selama jangka waktu yang lama.

#### **2.3.4. Metabolisme energi dari lemak**

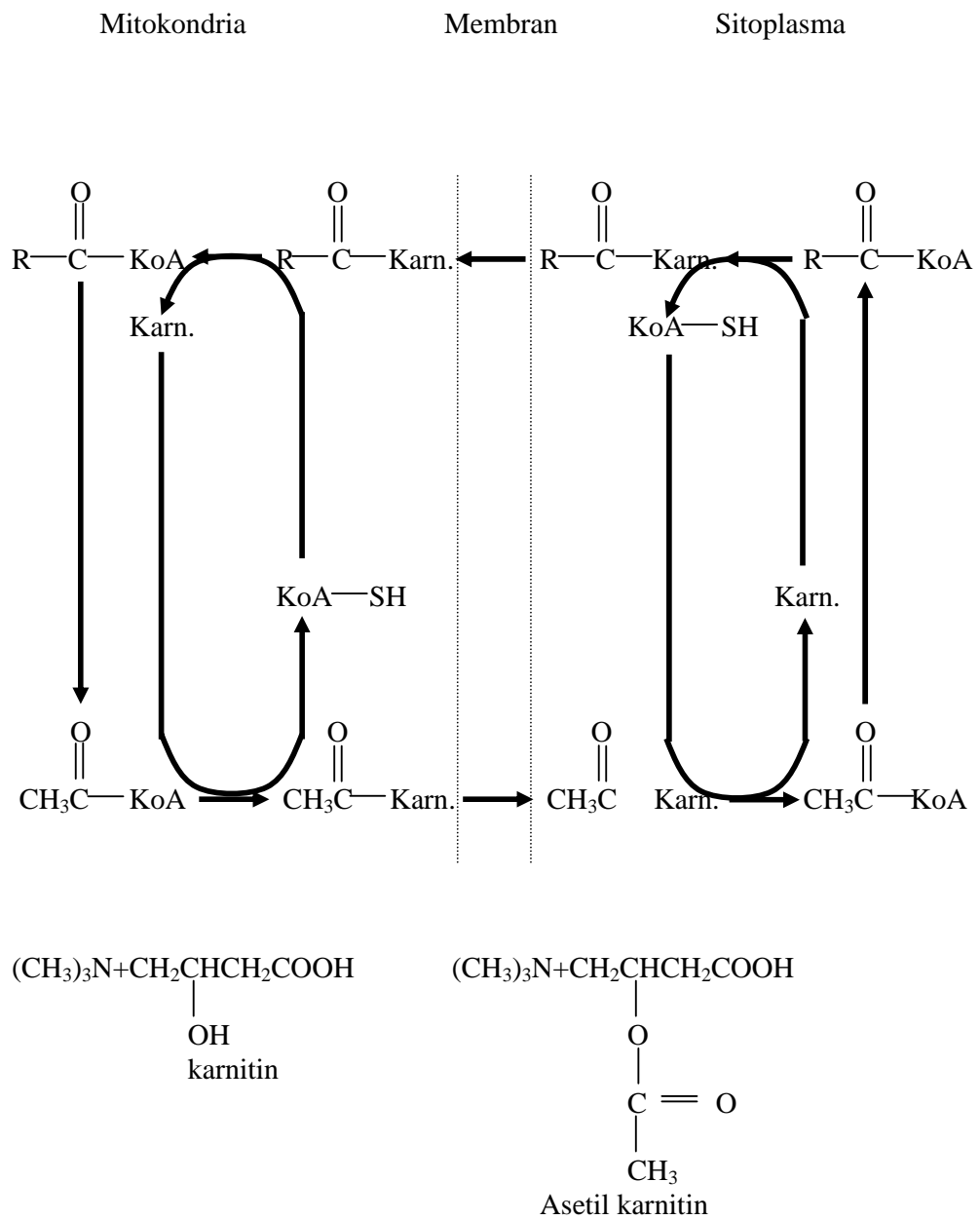
Asam palmitat (C16:0) merupakan salah satu asam lemak yang paling banyak diketahui proses metabolismenya, oleh karena itu untuk memudahkan pembahasan selanjutnya akan dipakai asam lemak ini. Proses penguraian asam lemak dimulai dengan tahap  $\beta$ -oksidasi. Proses oksidasi ini berlangsung dalam mitokondria. Tahap pertama adalah mengaktifkan asam palmitat bebas dengan asetil koenzim A dalam sitoplasma, oleh enzim asil koenzim A sintetase menghasilkan palmitoil koenzim A. Pada reaksi ini sebagai sumber energi digunakan satu molekul ATP untuk satu molekul palmitoil koenzim A yang terbentuk. Dalam hal ini terjadi dua reaksi pemecahan ikatan fosfat berenergi tinggi, yaitu terhidrolisisnya ATP menjadi AMP +  $PP_i$  dan terurainya  $PP_i$  menjadi 2  $P_i$  oleh enzim pirofosfatase. Dengan demikian untuk mengaktifkan satu molekul asam lemak dalam tahap reaksi ini, digunakan energi yang didapatkan dari pemecahan dua ikatan fosfat berenergi tinggi dari satu molekul ATP (Gambar 2.23).



**Gambar 2.23. Tahap reaksi pembentukan palmitoil-KoA**

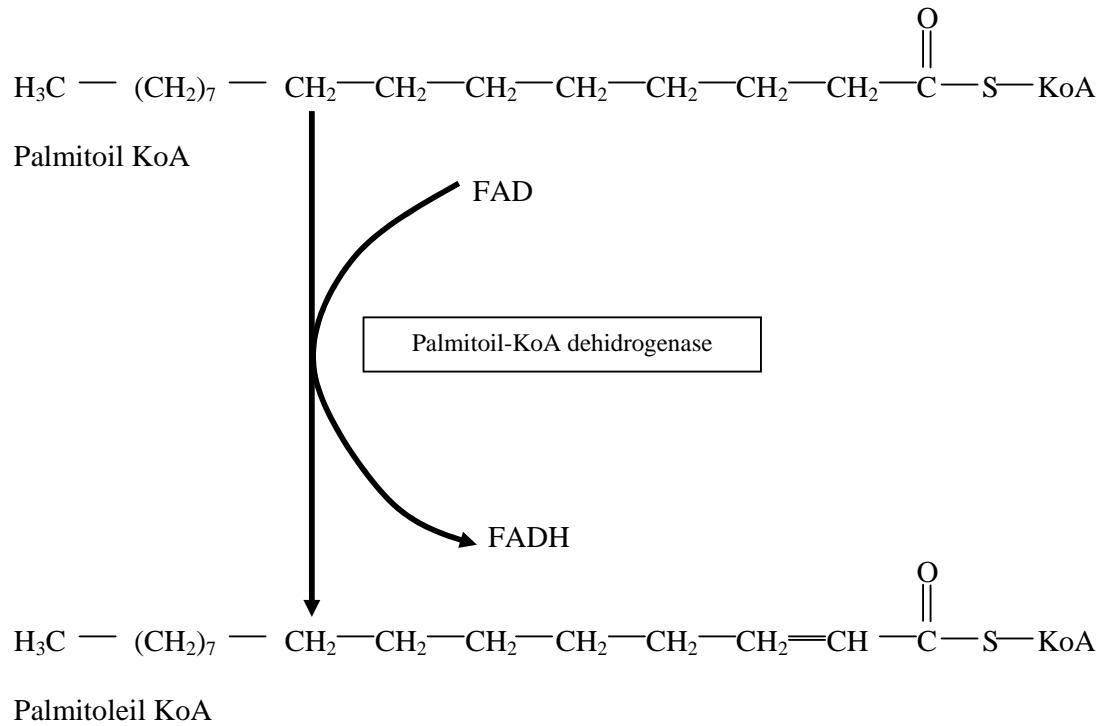
Tahap reaksi ke dua, palmitoil koenzim A diangkut dari sitoplasma ke dalam mitokondria dengan bantuan molekul pembawa atau karrier yaitu karnitin yang terdapat dalam membran mitokondria (Gambar 2.24).

Reaksi tahap ke tiga adalah proses dehidrogenasi palmitoil koenzim A yang telah berada di dalam mitokondria dengan enzim asil koenzim A dehidrogenase yang menghasilkan senyawa enoil koenzim A. Pada reaksi ini FAD (flavin adenin dinukleotida) yang bertindak sebagai koenzim direduksi menjadi FADH<sub>2</sub>. Dengan mekanisme fosforilasi bersifat oksidasi melalui rantai pernafasan suatu molekul FADH<sub>2</sub> dapat menghasilkan dua molekul ATP (Gambar 2.25).



**Gambar 2.24. Pengangkutan asam lemak melalui membran mitokondria**

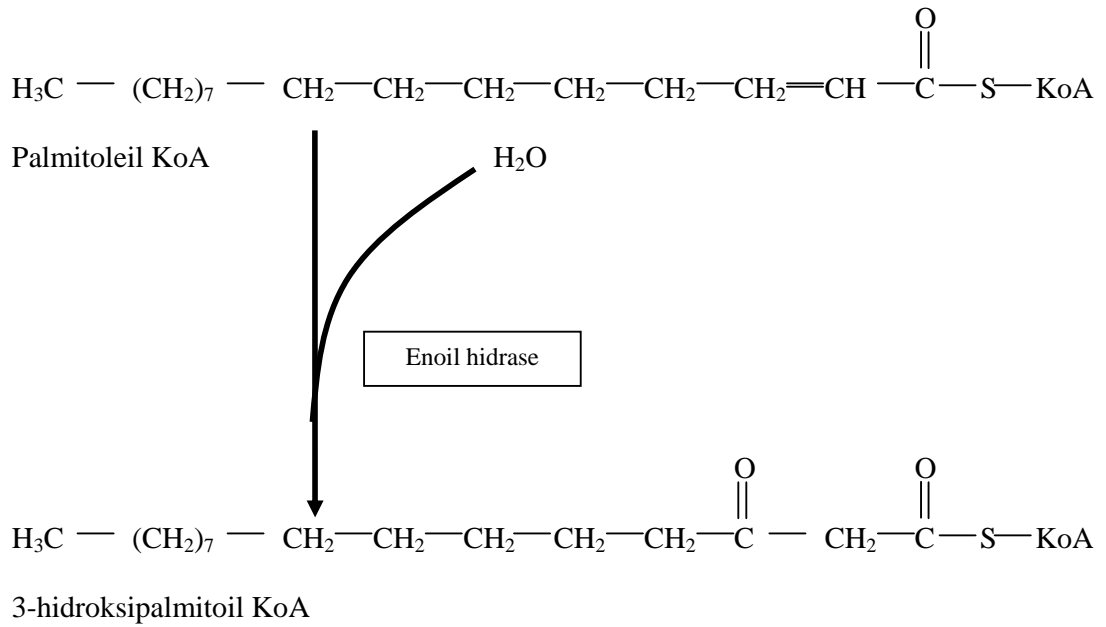




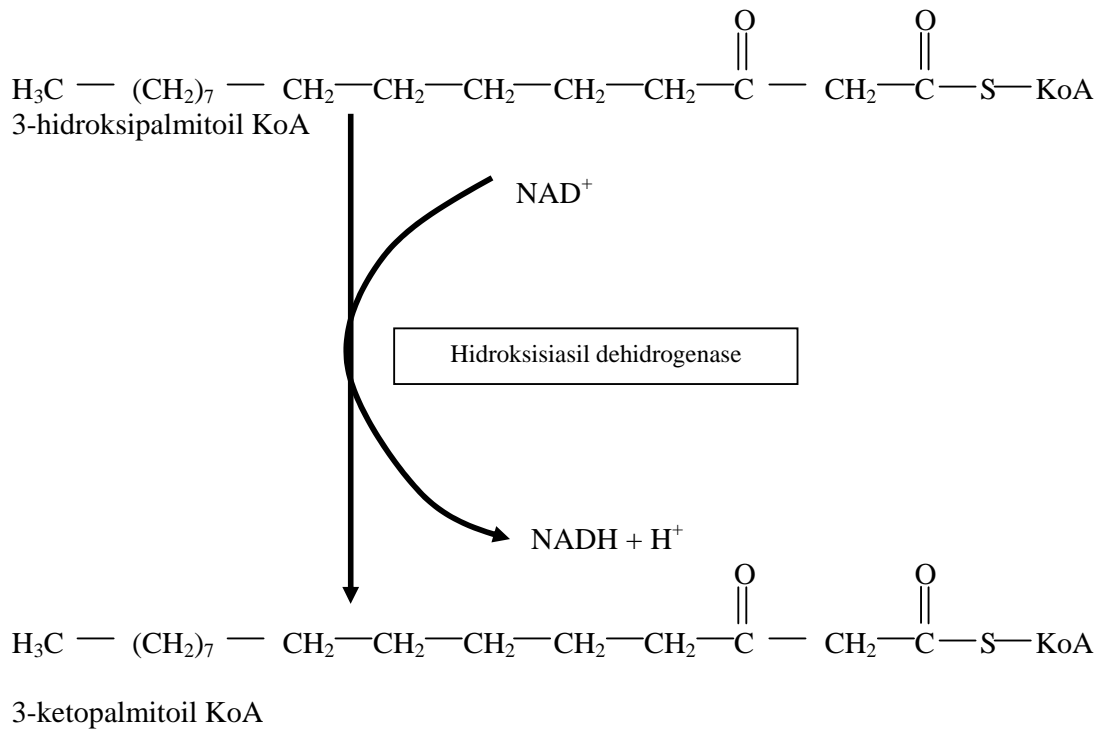
**Gambar 2.25. Reaksi dehidrogenasi dengan enzim palmitoil-KoA dehidrogenase**

Pada tahap reaksi ke empat, ikatan rangkap pada enoil koenzim A dihidratasi menjadi 3-hidroksipalmitoil koenzim A hidratase (Gambar 2.26).

Reaksi tahap ke lima adalah dehidrogenase dengan enzim 3-hidroksianil koenzim A dehidrogenase dan  $\text{NAD}^+$  sebagai koenzimnya. Pada reaksi ini 3-hidroksipalmitoil koenzim A dioksidasi menjadi 3-ketopalmitoil koenzim A, sedangkan  $\text{NADH}$  yang terbentuk dari  $\text{NAD}^+$  dapat dioksidasi kembali melalui mekanisme fosforilasi bersifat oksidasi yang dirangkaikan dengan rantai pernafasan menghasilkan tiga molekul ATP (Gambar 2.27).

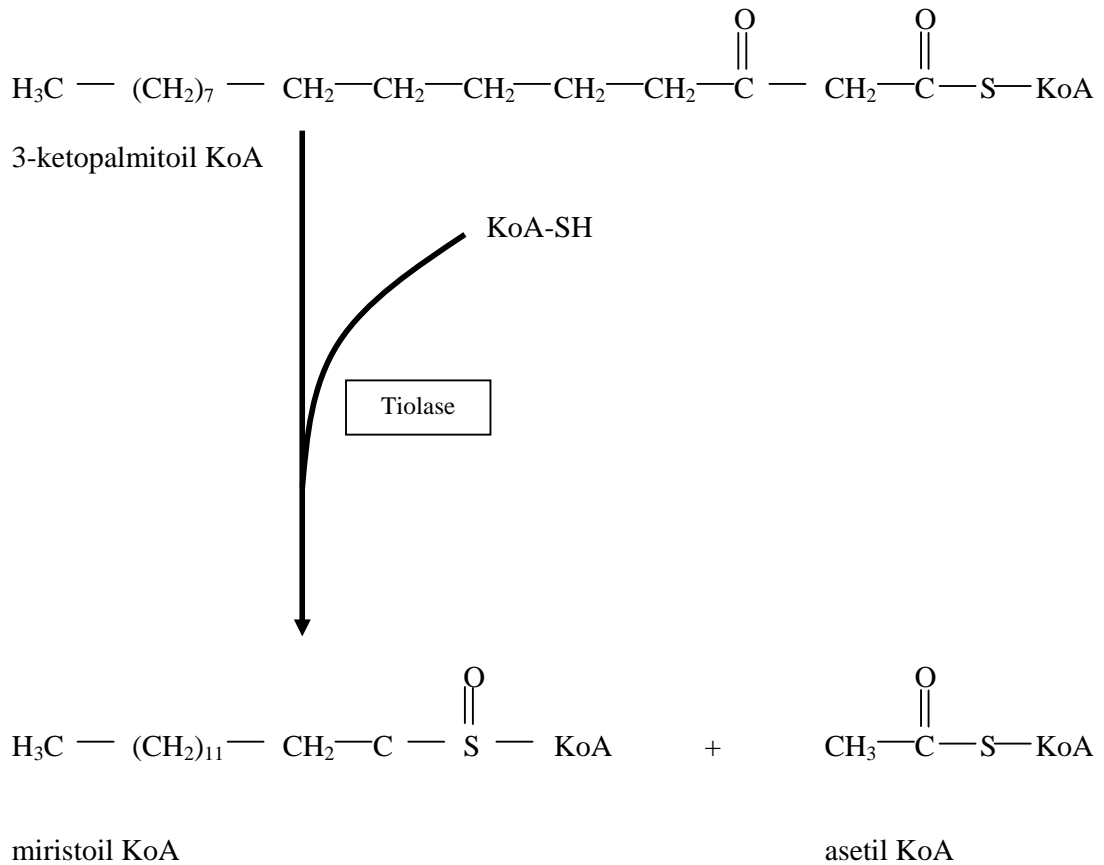


**Gambar 2.26. Reaksi hidratisasi dengan enzim enoil hidratase**



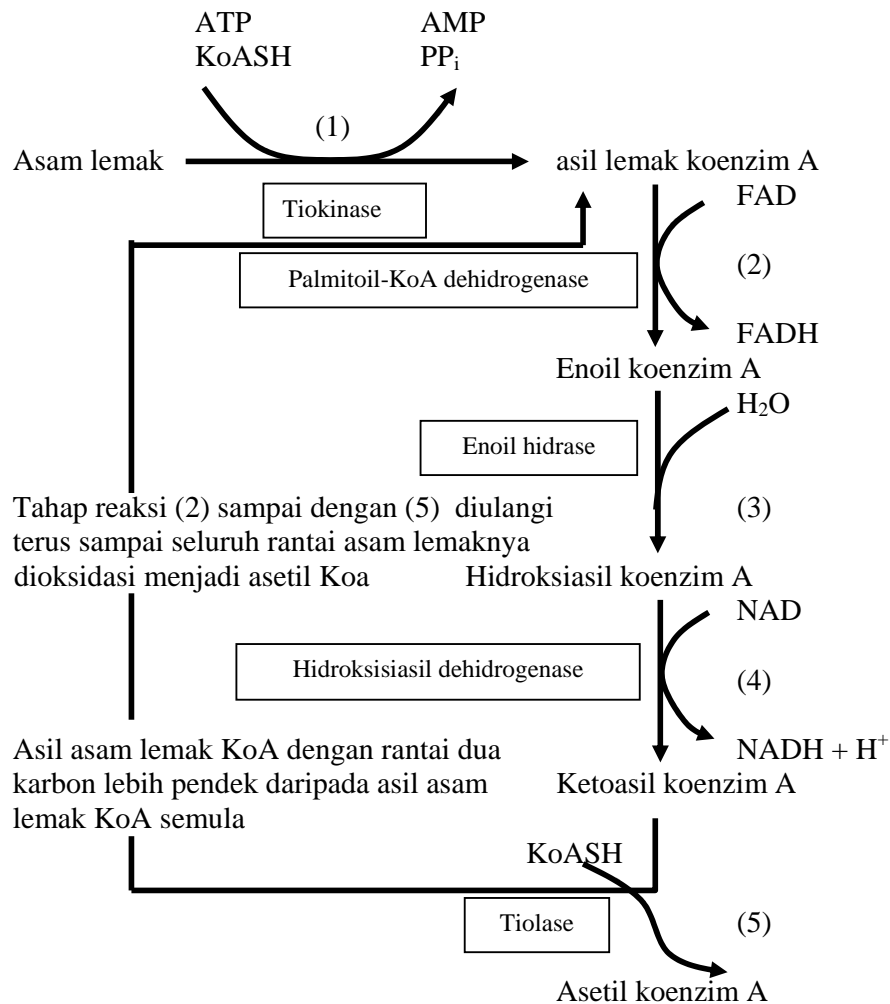
**Gambar 2.27. Reaksi dehidrogenasi dengan enzim β-ketoasil dehidrogenase**

Reaksi tahap terakhir adalah mekanisme oksidasi- $\beta$  adalah pemecahan molekul dengan enzim asetil koenzim A asetiltransferase atau disebut juga tiolase. Pada reaksi ini satu molekul koenzim A (KoA) bebas berinteraksi dengan 3-ketopalmitoil koenzim A menghasilkan satu molekul asetil koenzim A dan sisa rantai asam lemak dalam bentuk koenzim A-nya, yang mempunyai rantai dua atom karbon lebih pendek dari palmitoil koenzim A semula (Gambar 2.28).



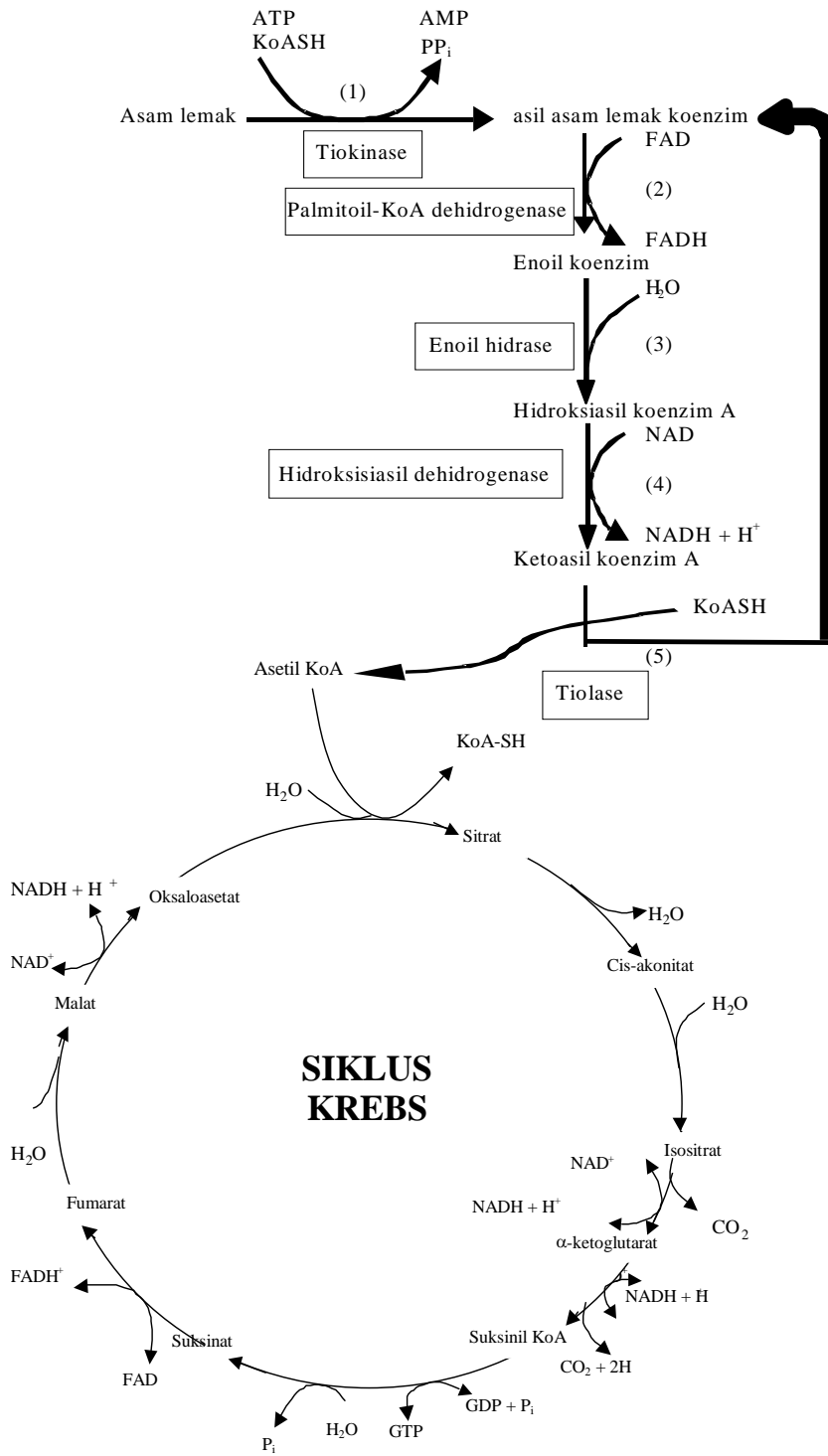
**Gambar 2.28. Tahap reaksi pelepasan satu molekul asetil KoA**

Proses degradasi asam lemak selanjutnya adalah pengulangan mekanisme oksidasi- $\beta$  secara kontinu sampai rantai panjang asam lemak tersebut habis dipecah menjadi molekul asetil koenzim A. Dengan demikian satu molekul asam palmitat (C16) menghasilkan 8 molekul asetil koenzim A (C2) dengan melalui tujuh kali oksidasi- $\beta$ . Reaksi keseluruhan dari  $\beta$ -oksidasi asam palmitat dapat dilihat pada Gambar 2.29.



**Gambar 2.29. Reaksi  $\beta$ -oksidasi asam palmitat**

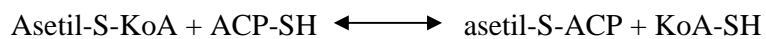
Setelah semua reaksi  $\beta$ -oksidasi berakhir maka dilanjutkan dengan masuk ke dalam siklus Krebs. Reaksi keseluruhan katabolisme asam lemak palmitat dapat dilihat pada Gambar 2.30.



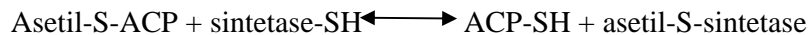
**Gambar 2.30. Katabolisme asam palmitat**

Reaksi kebalikannya yaitu anabolisme atau biosintesis untuk membentuk asam lemak dari asetil koenzim A terjadi di hampir semua bagian tubuh hewan, terutama dalam jaringan hati, jaringan lemak dan kelenjar susu. Biosintesis ini berlangsung melalui mekanisme yang dalam beberapa hal berbeda dengan oksidasi asam lemak. Secara keseluruhan biosintesis asam lemak terbagi menjadi tiga tahap utama. Tahap pertama pembentukan malonil koenzim A dari asetil koenzim A. Tahap ke dua adalah pemanjangan rantai asam lemak sampai terbentuknya asam palmitat secara kontinu dengan tiap kali penambahan malonil koenzim A dan pelepasan CO<sub>2</sub>. Tahap ke tiga adalah pemanjangan rantai asam palmitat secara bertahap bergantung pada keadaan dan komposisi faktor penunjang reaksi di dalam sel.

Tahap pertama dimulai dengan reaksi antara asetil koenzim A dengan gugus SH (sulfhidril) dari molekul ACP (*acyl carrier protein*) merupakan reaksi awal dalam mekanisme biosintesis asam lemak. Reaksi ini dikatalisis oleh salah satu dari enam kompleks enzim sintetase, ACP-asiltransferase, dengan persamaan reaksi :

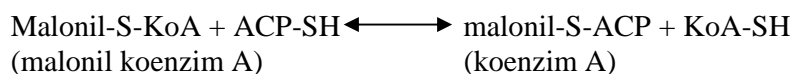


Reaksi selanjutnya adalah pemindahan gugus asetil dari ACP ke gugus SH dari enzim beta-ketoasil-ACP-sintetase, menghasilkan asetil S-beta-ketoasil-ACP-sintetase, disingkat asetil-S-sintetase.

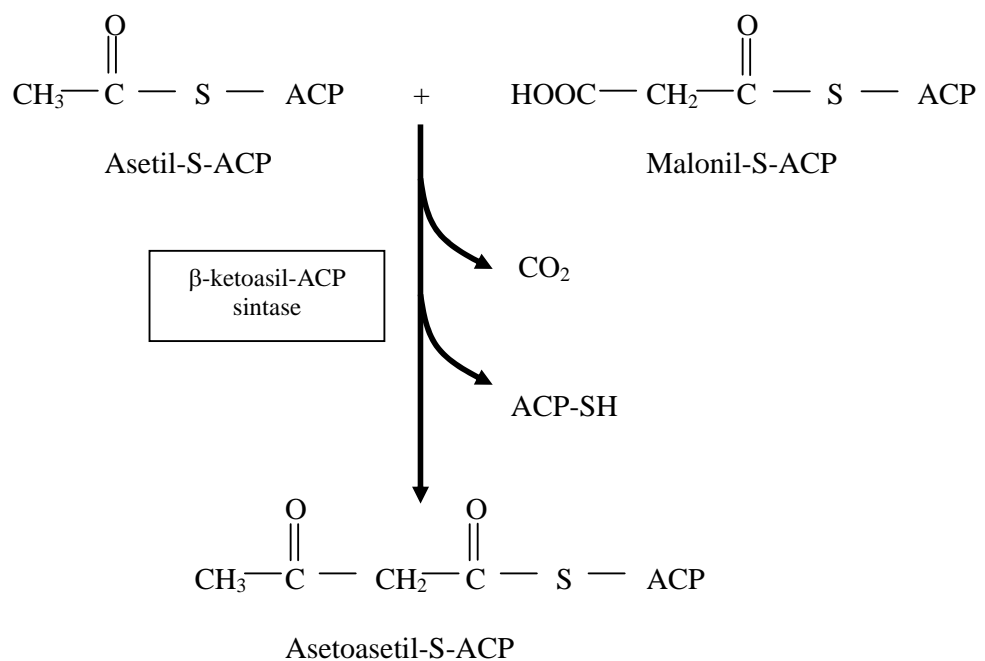


Dengan telah terikatnya gugus asetil pada enzim pertama dari enam kompleks enzim sintetase asam lemak tersebut, dapatlah dimulai mekanisme pemanjangan rantai asam lemak dengan penambahan dua atom karbon pada malonil koenzim, secara berturut-turut sampai terbentuk asam palmitat.

Tahap ke dua adalah reaksi kondensasi pembentukan malonil-S-ACP. Reaksi kondensasi didahului dengan reaksi pembentukan malonil-S-ACP dari malonil-S-KoA, yaitu pemindahan gugus malonil dari ACP ke KoA. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim ACP-malonil-transferase :



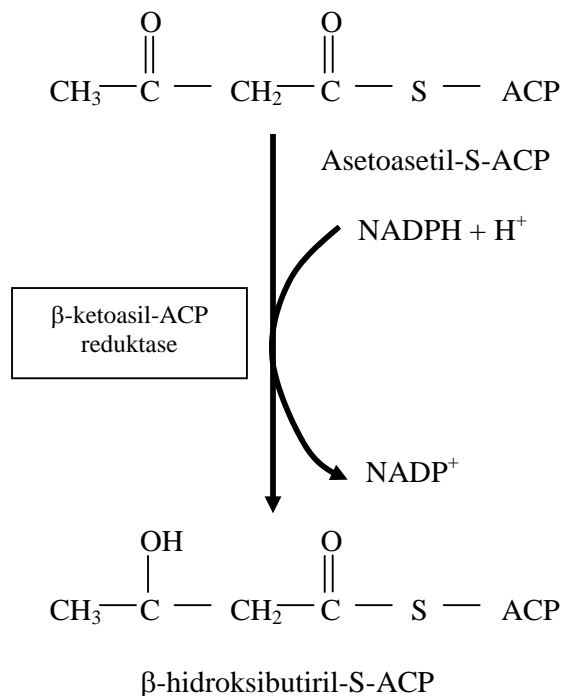
Reaksi berikutnya adalah kondensasi antara asetil-S-sintase dengan malonil-S-ACP menghasilkan asetoasetil-S-ACP. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim beta-ketoasil-ACP-sintase dan laju reaksinya didorong oleh pelepasan CO<sub>2</sub> dari malonil-S-ACP, yaitu reaksi eksergonik dekarboksilasi gugus malonil, yang memberikan dorongan termodinamik ke arah pembentukan aseto-asetil-S-ACP (Gambar 2.31).



**Gambar 2.31. Reaksi kondensasi pembentukan asetoasetil-S-ACP**

Pada tahap ke tiga ini, terdapat dua reaksi reduksi asetoasetil-S-ACP. Pada reaksi reduksi yang pertama, aseto-asetil-S-ACP direduksi dengan NADPH dan enzim beta-ketoasil-ACP-reduktase menghasilkan D-β-hidroksibutiril-S-ACP, yang selanjutnya mengalami dehidratasi dengan enzim enoil-ACP-hidratase menghasilkan krotonil-ACP. Reaksi reduksi yang ke dua adalah hidrogenasi krotonil-ACP dengan enzim enoil-ACP-reduktase yang menghasilkan butiril-ACP. Seperti juga reaksi reduksi yang pertama, reaksi ini menggunakan

NADPH-NADP<sup>+</sup> (bukan NADH-NAD<sup>+</sup> seperti yang dipakai pada proses oksidasi asam lemak) sebagai sistem koenzimnya (Gambar 2.32).



**Gambar 2.32. Reaksi reduksi asetoasetil-S-ACP**

Dengan pembentukan butiril-ACP, selesailah satu dari tujuh daur yang dilakukan oleh enzim kompleks sintetase untuk menghasilkan palmitoil-KoA. Untuk memulai daur yang berikutnya, gugus butiril dipindahkan dari ACP ke enzim  $\beta$ -ketoasil-ACP-sintase dan ACP mengambil satu gugus malonil dari molekul malonil Co-A yang lainnya. Selanjutnya daur diulangi dengan reaksi kondensasi antara malonil-ACP dengan butiril-S- $\beta$ -ketoasil-ACP sintase menghasilkan  $\beta$ -ketoheksanoil-S-ACP dan CO<sub>2</sub>. Demikianlah setelah tujuh kali mekanisme daur berlangsung dengan enzim kompleks sintetase asam lemak, terbentuklah palmitoil-ACP sebagai hasil akhir. Selanjutnya gugus palmitoil ini dapat mengalami beberapa kemungkinan, bergantung pada kondisi dalam sel dan jenis jasadnya. Kemungkinan itu adalah, pertama, gugus palmitoil dilepaskan dari enzim sintetase kompleks, dengan bantuan enzim tioesterase, menghasilkan asam palmitat bebas, ke dua, gugus palmitoil dipindahkan dari ACP ke KoA, ke tiga,



gugus palmitoil digabungkan langsung ke dalam asam fosfatidat dalam proses biosintesis fosfolipid dan triasil gliserol. Gambar 2.33 menunjukkan mekanisme reaksi keseluruhan proses biosintesis asam palmitat dari asetil-KoA.

Reaksi oksidasi dan biosintesis asam palmitat mempunyai perbedaan yang cukup penting. Perbedaan tersebut terdapat pada Tabel 2.3.

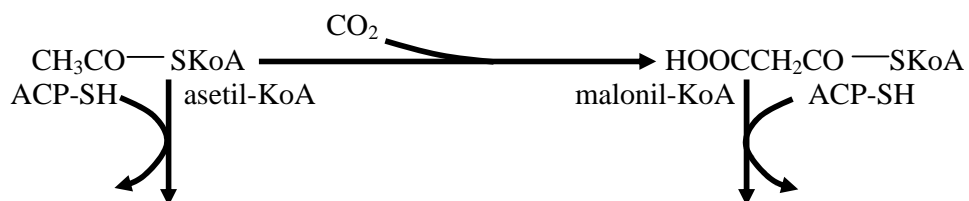
**Tabel 2.3. Perbedaan oksidasi dengan biosintesis asam palmitat**

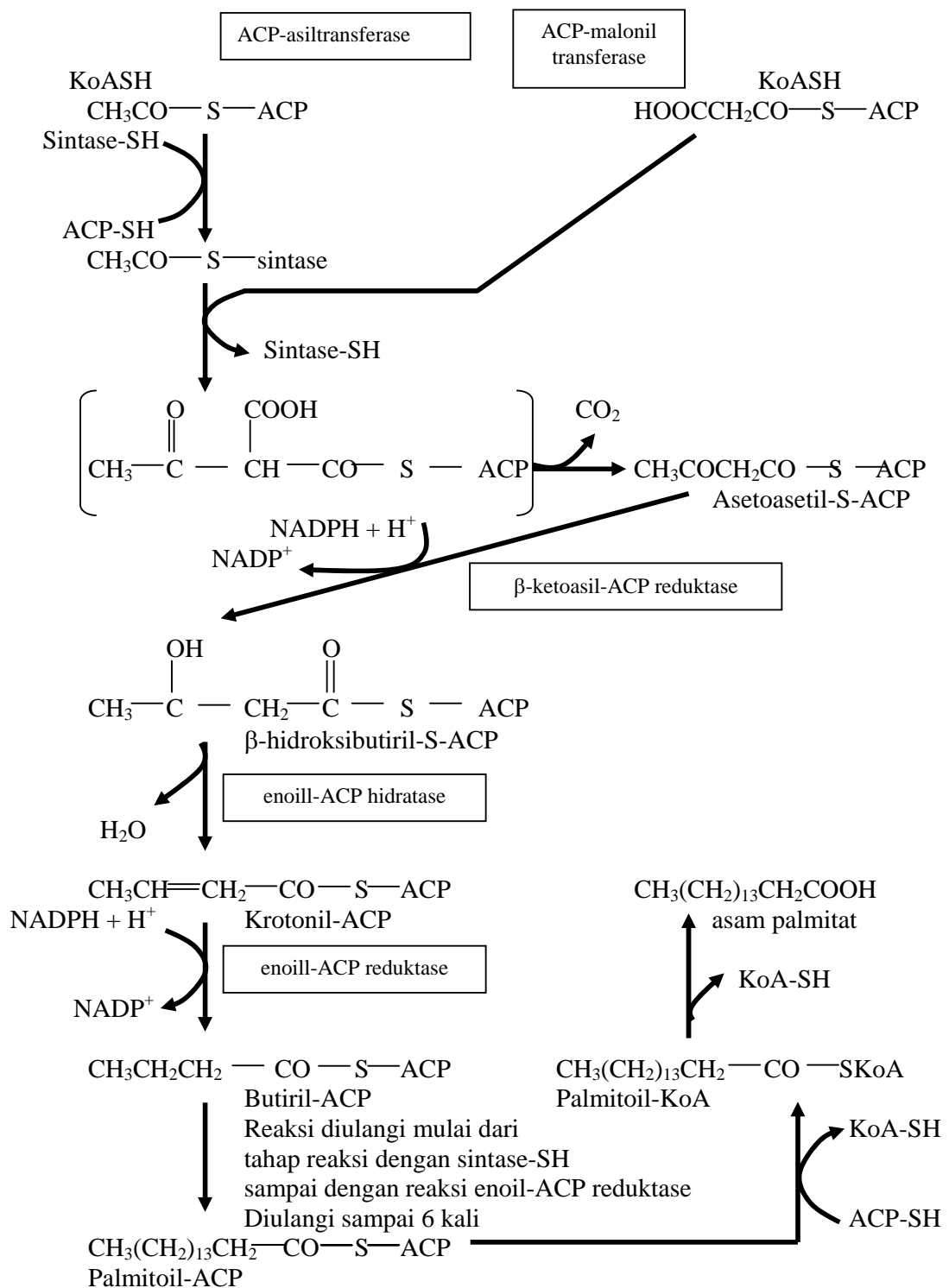
No.	Komponen	Oksidasi	Biosintesis
1.	Tempat	Mitokondria	Sitoplasma
2.	Sistem pembawa	KoA	ACP
3.	Molekul pemanjang rantai	Asetil-KoA (beratอม karbon dua)	Malonil-KoA (beratอม karbon tiga)
4.	Sistem koenzim dalam reaksi hidrogenasi	NAD <sup>+</sup> /NADH & FAD/FADH <sub>2</sub>	NADPH/NADP <sup>+</sup>

#### 2.4. Energi dari Protein

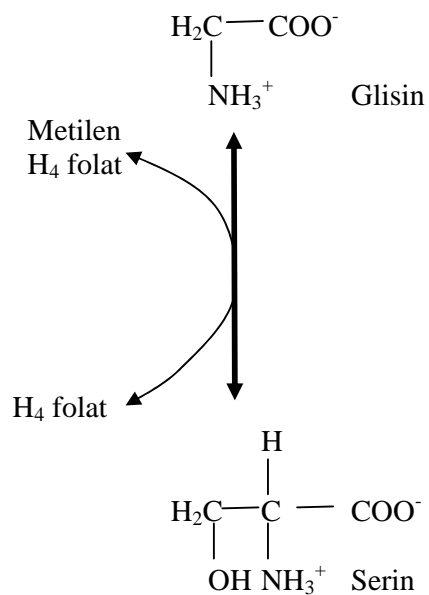
Metabolisme protein tidak secara langsung terlibat dalam produksi energi, akan tetapi metabolisme protein terlibat dalam produksi enzim, hormon, komponen struktural, dan protein darah dari sel-sel badan dan jaringan. Metabolisme energi yang berasal dari protein didahului dengan perombakan protein menjadi asam-asam amino. Kemudian gugus amin asam-asam amino dilepas gugus aminonya melalui deaminasi oksidatif di sel-sel hati. Hasil deaminasi akan masuk dalam siklus Krebs guna pembentukan energi, atau melalui piruvat dan asetil koenzim A sebelum masuk ke siklus Krebs.

Kerangka karbon dari asam-asam amino alanin, sistein, sistin, glisin, treonin, serin dan hidrosiprolin diubah menjadi piruvat. Pembentukan piruvat dari glisin dapat terjadi dengan konversi menjadi serin yang dikatalisis oleh enzim serin hidroksimetiltransferase (Gambar 2.34).



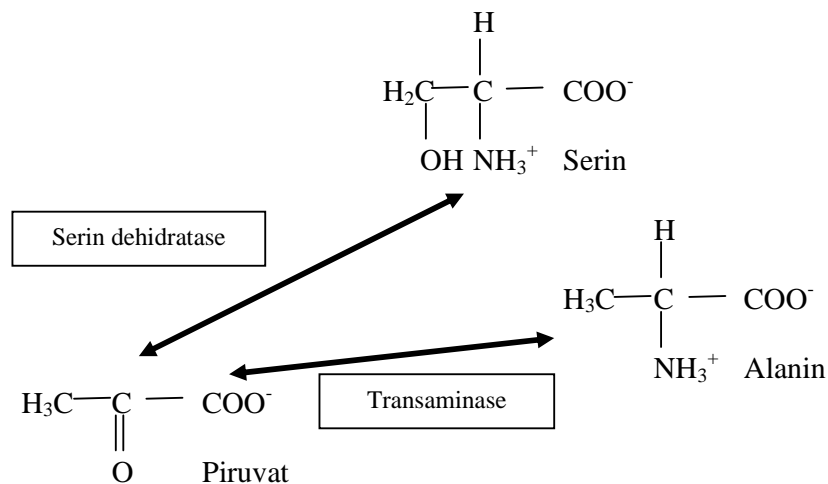


**Gambar 2.33. Mekanisme reaksi keseluruhan proses biosintesis asam palmitat dari asetil-KoA**



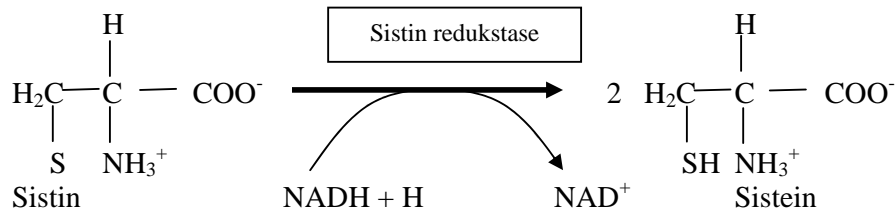
**Gambar 2.34. Reaksi glisin menjadi serin**

Reaksi alanin transaminase dan serin dehidratase, ke duanya memerlukan piridoksal fosfat sebagai koenzim. Reaksi serin dehidratase berlangsung melalui pembuangan H<sub>2</sub>O dari serin, membentuk suatu asam amino tidak jenuh. Kemudian disusun kembali menjadi asam α-amino yang terhidrolisis spontan menjadi piruvat dan amonia (Gambar 2.35).



**Gambar 2.35. Konversi alanin dan serin menjadi piruvat**

Jalan katabolik utama dari sistin adalah konversi menjadi sistein yang dikatalisis oleh enzim sistin reduktase. Setelah itu akan bergabung dengan katabolisme sistein (Gambar 2.36).



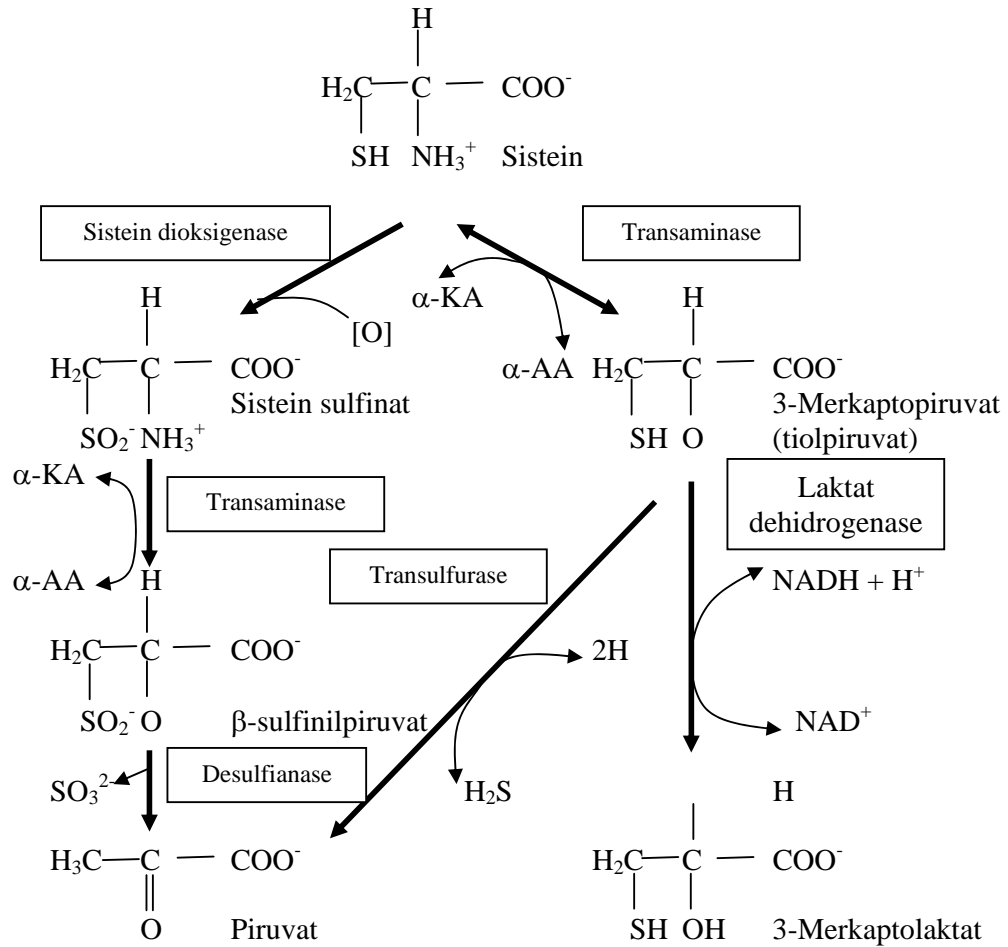
**Gambar 2.36. Reaksi sistin menjadi sistein**

Sistein dikatabolisme melalui dua jalan katabolisme utama yaitu jalan oksidasi langsung (sistein sulfinat) dan jalan transaminasi (3-merkaptopiruvat). Ke dua jalan tersebut memerlukan enzim transaminase (Gambar 2.37).

Treonin dipecah menjadi asetaldehida dan glisin oleh treonin aldolase. Kemudian asetaldehida membentuk asetil koenzim A, sementara glisin sudah dibicarakan di atas (Gambar 2.38).

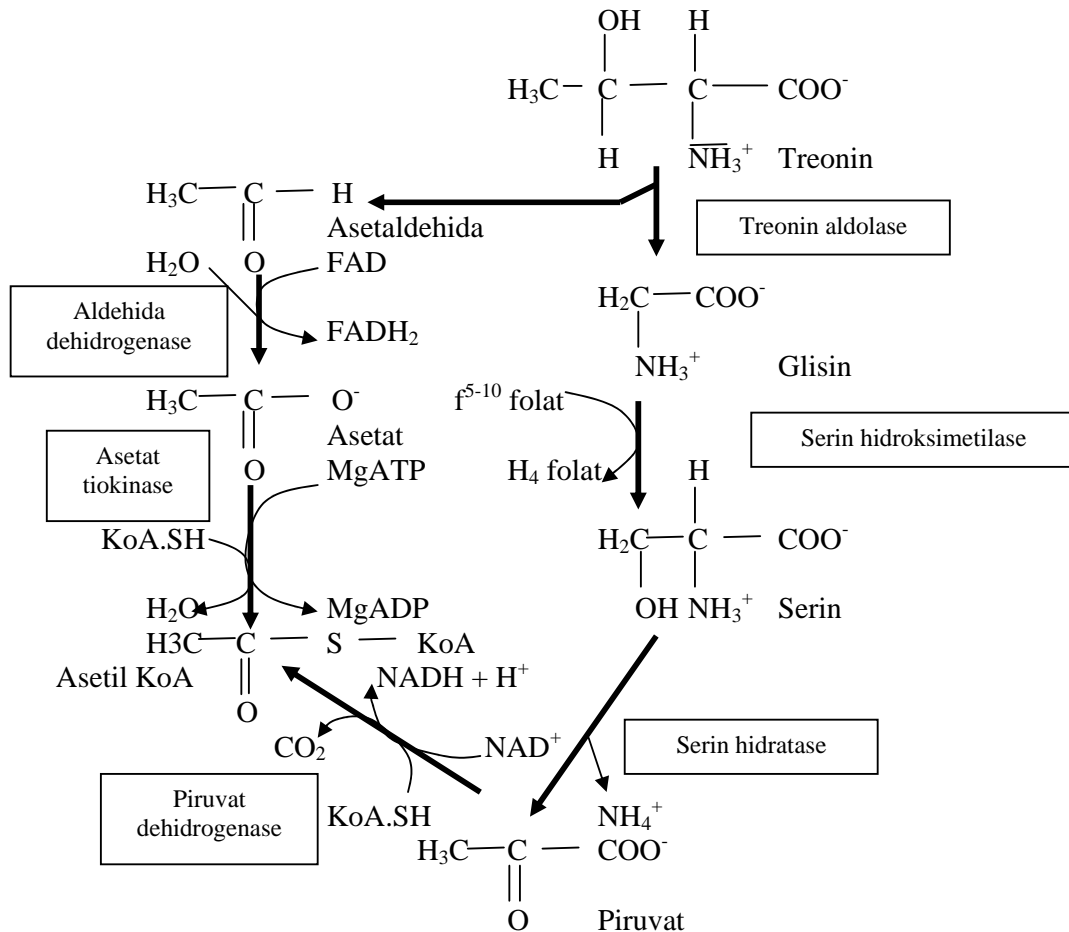
Tiga dari lima karbon 4-hidroksi-L-prolin dikonversi menjadi piruvat, dua sisanya membentuk gliksilat. Kemudian tahap akhir reaksi melibatkan aldolase yang memecah hidrosiprolin menjadi piruvat dan gliksilat (Gambar 2.39).

Semua asam amino yang membentuk piruvat dapat dikonversi menjadi asetil koenzim A. Di samping itu ada lima asam amino yang membentuk asetil koenzim A tanpa membentuk piruvat lebih dahulu. Asam-asam amino tersebut adalah fenilalanin, tirosin, triptofan, lisin dan leusin. Fenilalanin mula-mula dikonversi menjadi tirosin oleh fenilalanin hidroksilase. Lima reaksi enzimatik berurutan mengkonversi tirosin menjadi fumarat dan asetoasetat, yaitu (1) transaminasi menjadi p-hidroksifenilpiruvat, (2) oksidasi dan migrasi sekaligus dari rantai samping 3-karbon dan dekarboksilasi yang membentuk homogentisat, (3) oksidasi homogentisat menjadi maleilasetoasetat, (4) isomerasi



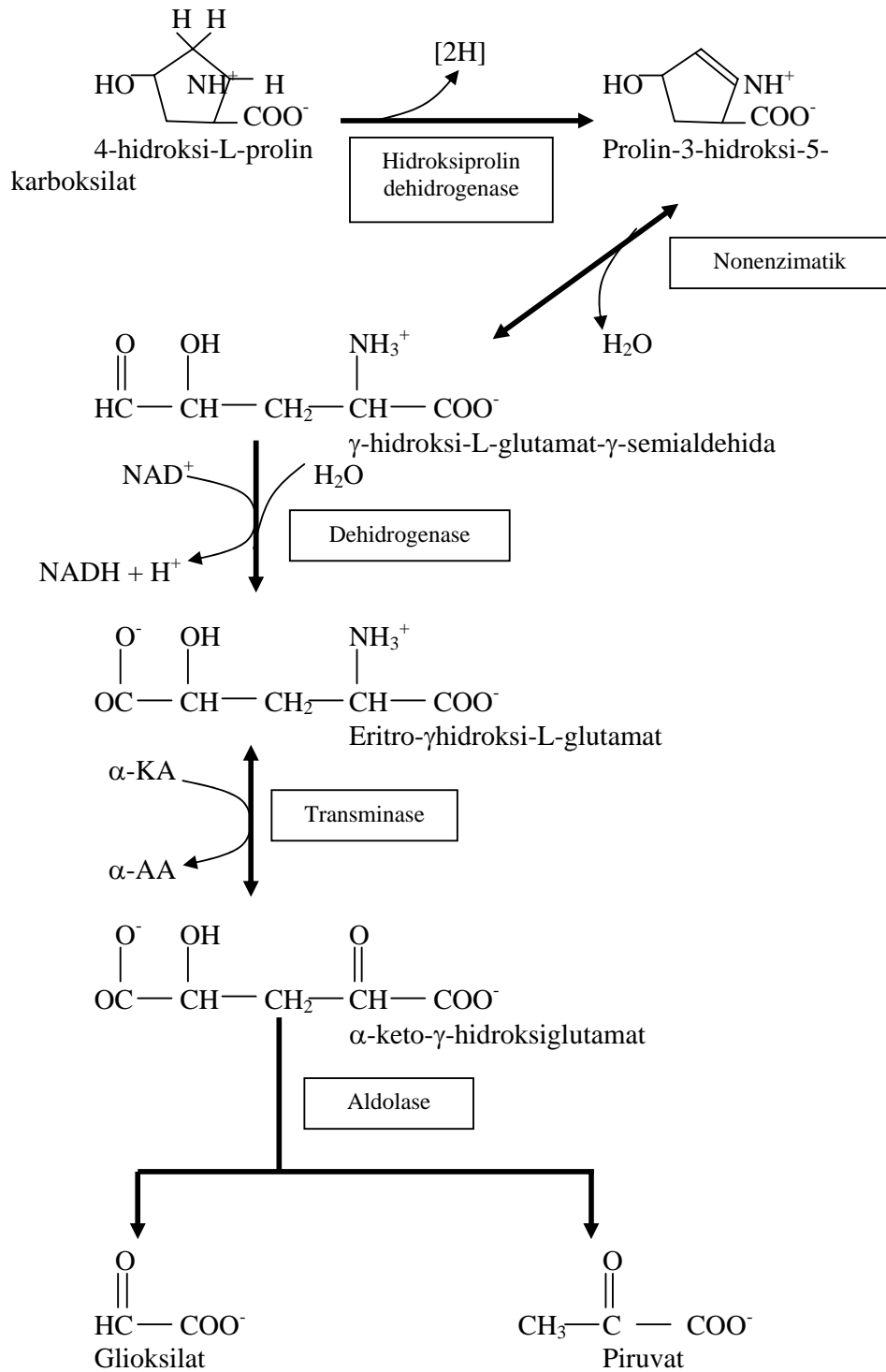
**Gambar 3.37. Katabolisme L-sistein menjadi piruvat**

maleiasetoasetat menjadi fumarilasetofumarat dan (5) hidrolisis fumarilasetoasetat menjadi fumarat dan osetoasetat. Asetoasetat selanjutnya dapat mengalami pembelahan tiolitik menjadi asetat dan asetil koenzim A (Gambar 2.40).

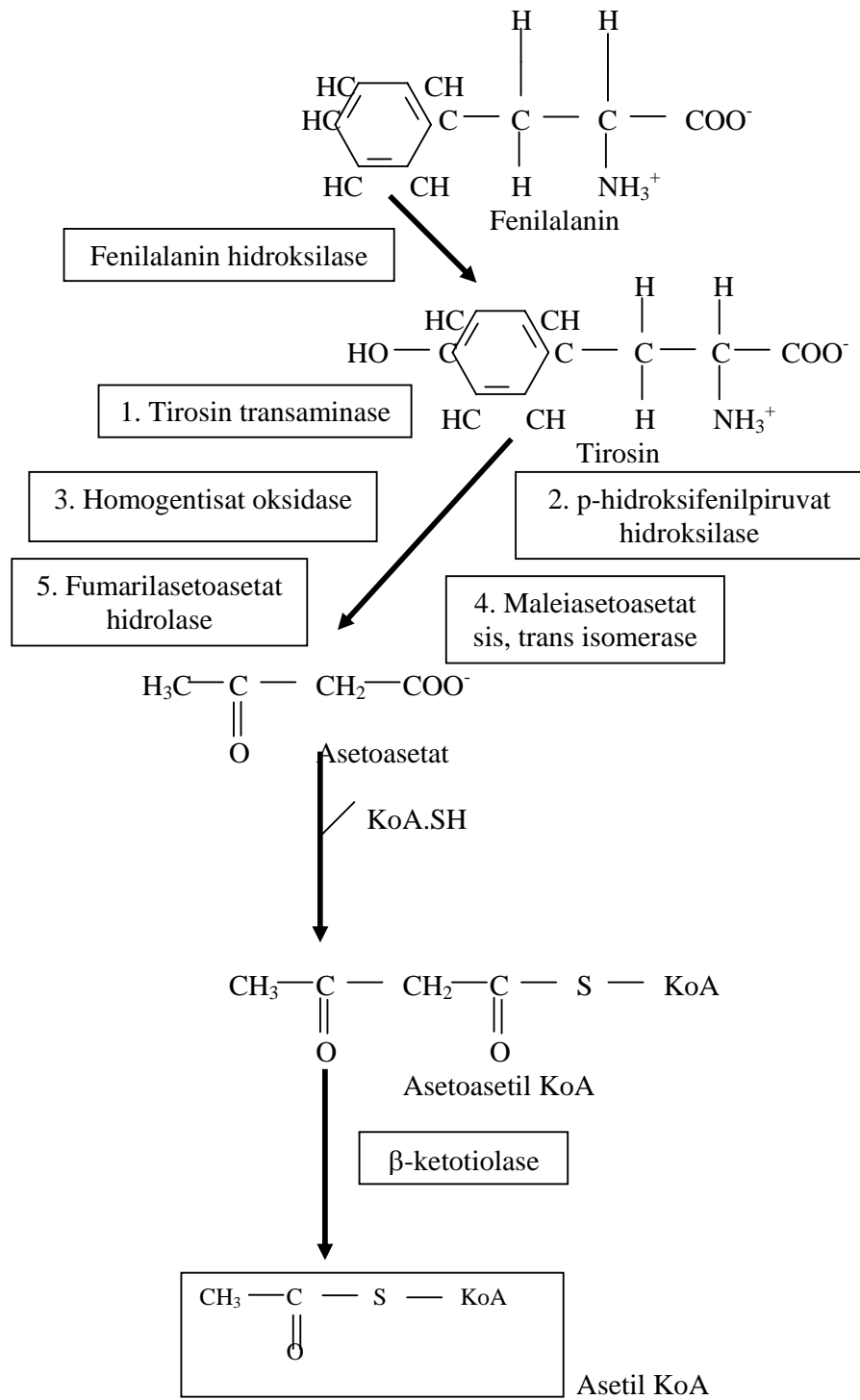


**Gambar 2.38. Katabolisme treonin**

L-lisin dikonversi menjadi  $\alpha$ -aminoadipat dan  $\alpha$ -ketoadipat. L-lisin pertama kali berkondensasi dengan  $\alpha$ -ketoglutarat yang memecah air dan membentuk basa Schiff. Kemudian direduksi menjadi sakaropin oleh dehidrogenase dan kemudian dioksidasi oleh dehidrogenase ke dua. Penambahan air membentuk L-glutamat dan L- $\alpha$ -aminoadipat- $\delta$ -semialdehida. Katabolisme lebih lanjut dari  $\alpha$ -aminoadipat memerlukan transaminasi menjadi  $\alpha$ -ketoadipat, yang mungkin diikuti oleh dekarboksilasi oksidatif menjadi glutaril-KoA (Gambar 2.41).

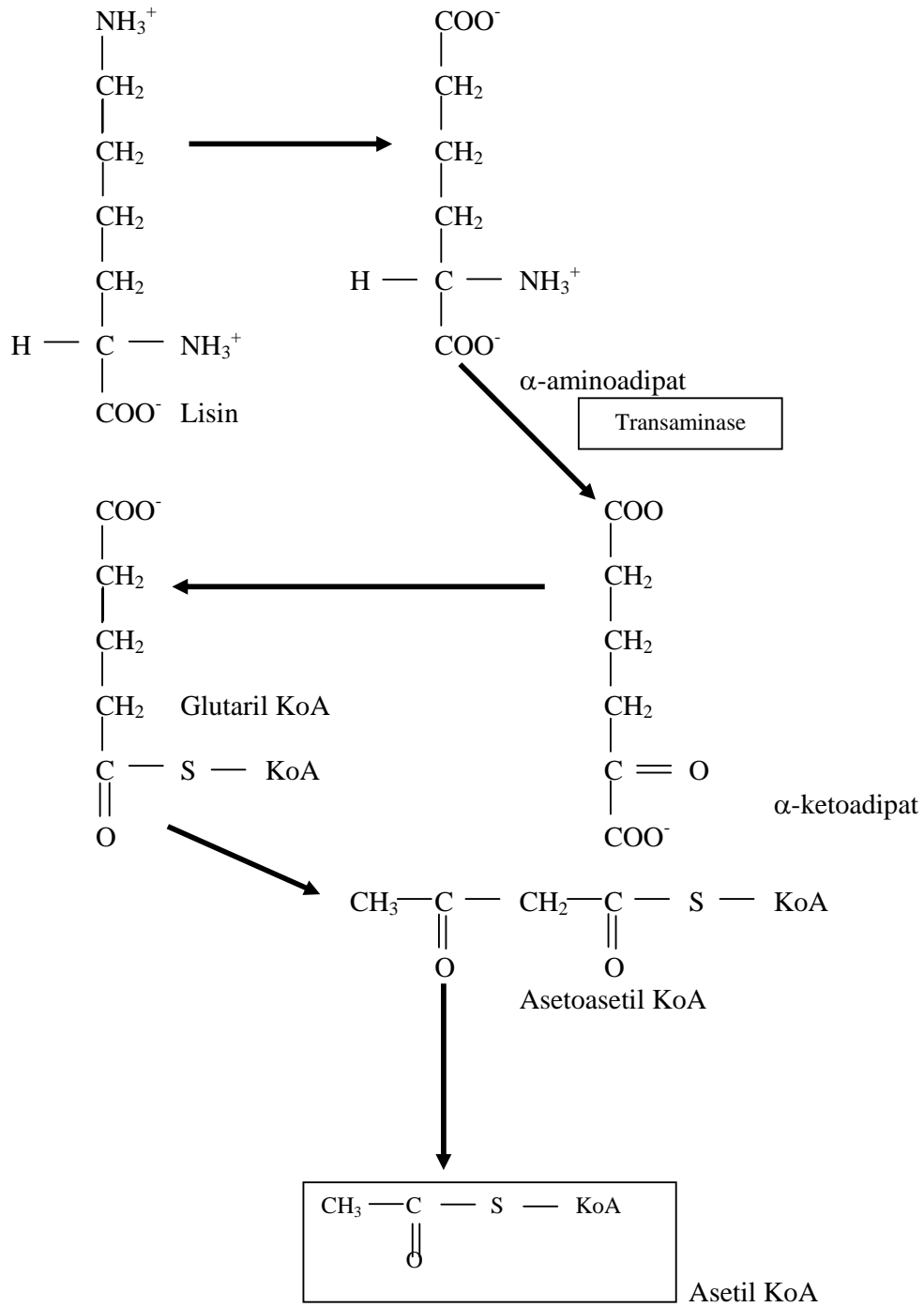


**Gambar 3.39. Konversi hidroksiprolin menjadi piruvat**



Gambar 2.40. Konversi fenilalanin dan tirosin menjadi asetil koenzim A



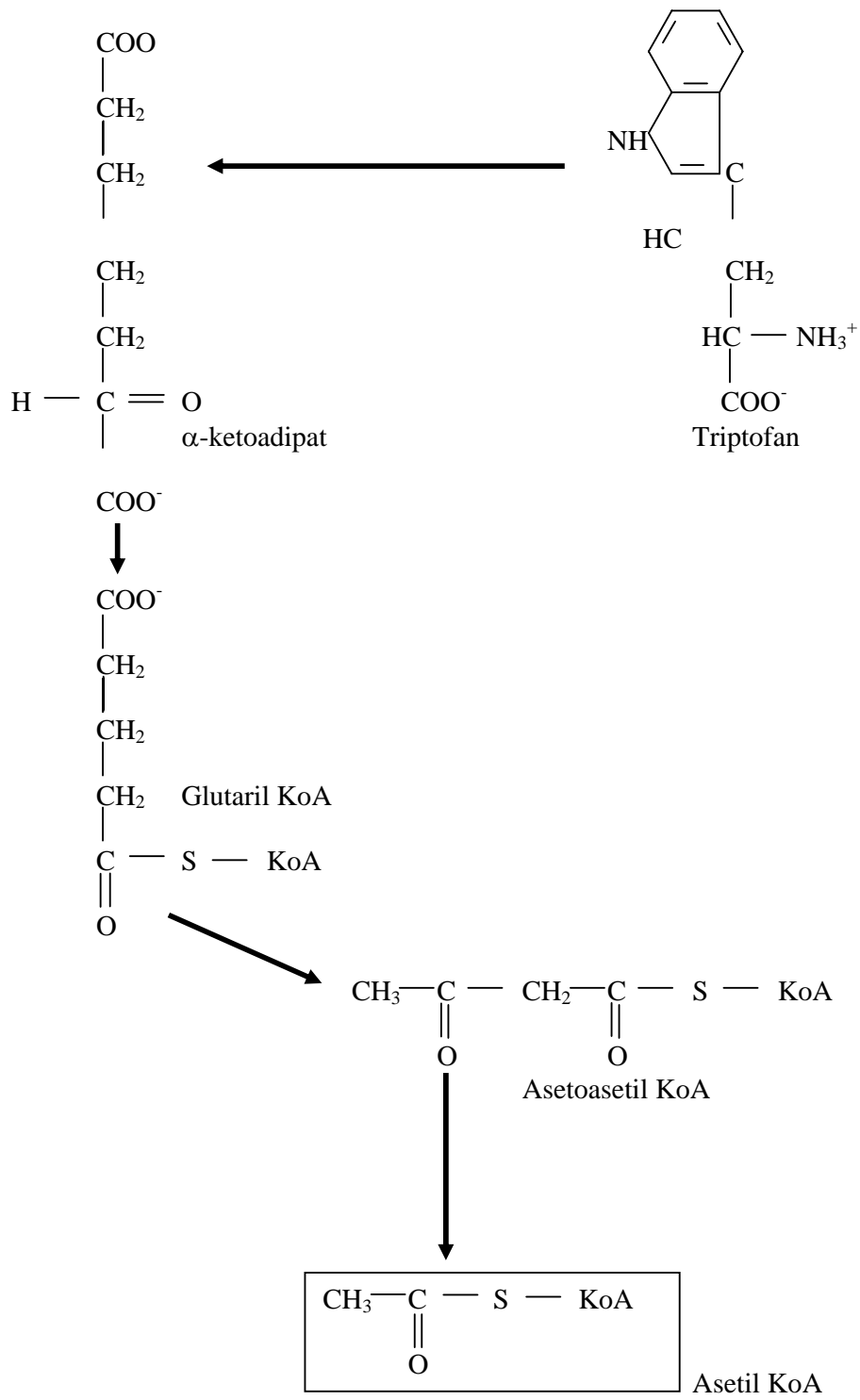


**Gambar 2.41. Konversi L-ლისინ menjadi asetil koenzim A**

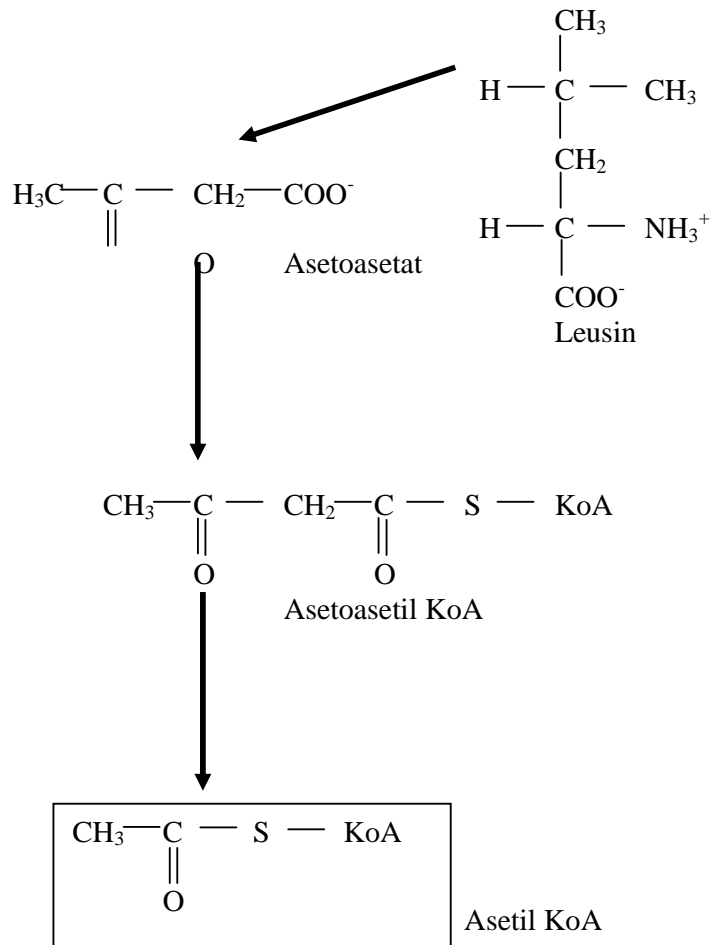
Triptofan oksigenase (triptofan pirolase) mengkatalisis pembelahan cincin dengan inkorporasi 2 atom oksigen yang membentuk N-formilkinurenin. Oksigenasinya adalah metaloprotein besiforfin. Pengeluaran gugus formil dari N-formilkinurenin secara hidrolitik dikatalisis oleh kinurenin formilase yang menghasilkan kinurenin. Kemudian dideaminasi dengan transaminase gugus amino rantai samping ke ketoglutarat. Metabolisme lebih lanjut dari kinurenin melibatkan konversi menjadi 3-hidroksikinurenin. Kinurenin dan hidroksikinurenin dikonversi menjadi hidroksiantranilat oleh enzim kinureninase suatu enzim piridoksal fosfat (Gambar 2.42). Sebelum leusin diubah menjadi asetil koenzim A diubah dahulu menjadi asetoasetat, sama dengan perubahan tirosin (Gambar 2.43)

Suksinil koenzim A merupakan hasil akhir dari katabolisme metionin, isoleusin dan valin yang hanya sebagian rangka dikonversi. Empat per lima karbon valin, tiga per lima karbon metionin dan setengah karbon isoleusin membentuk suksinil koenzim A. L-metionin berkondensasi dengan ATP membentuk S-adenosilmetionin atau "metionin aktif". Pengeluaran gugus metil membentuk S-adenosil-homosistein. Hidrolisis ikatan S-Peserta menghasilkan L-homosistein dan adenosin. Homosistein selanjutnya berkondensasi dengan serin, membentuk sistationin. Pembelahan hidrolitik sistationin membentuk L-homoserin dan sistein. Ke dua reaksi ini oleh karenanya juga terlibat dalam biosintesis sistein dan serin. Homoserin dikonversi menjadi  $\alpha$ -ketobutirat oleh homoserin deaminase. Konversi  $\alpha$ -ketobutirat menjadi propionil-KoA selanjutnya terjadi dengan cara biasa untuk dekarboksilasi oksidatif asam  $\alpha$ -keto membentuk derivat asil KoA (Gambar 2.44).

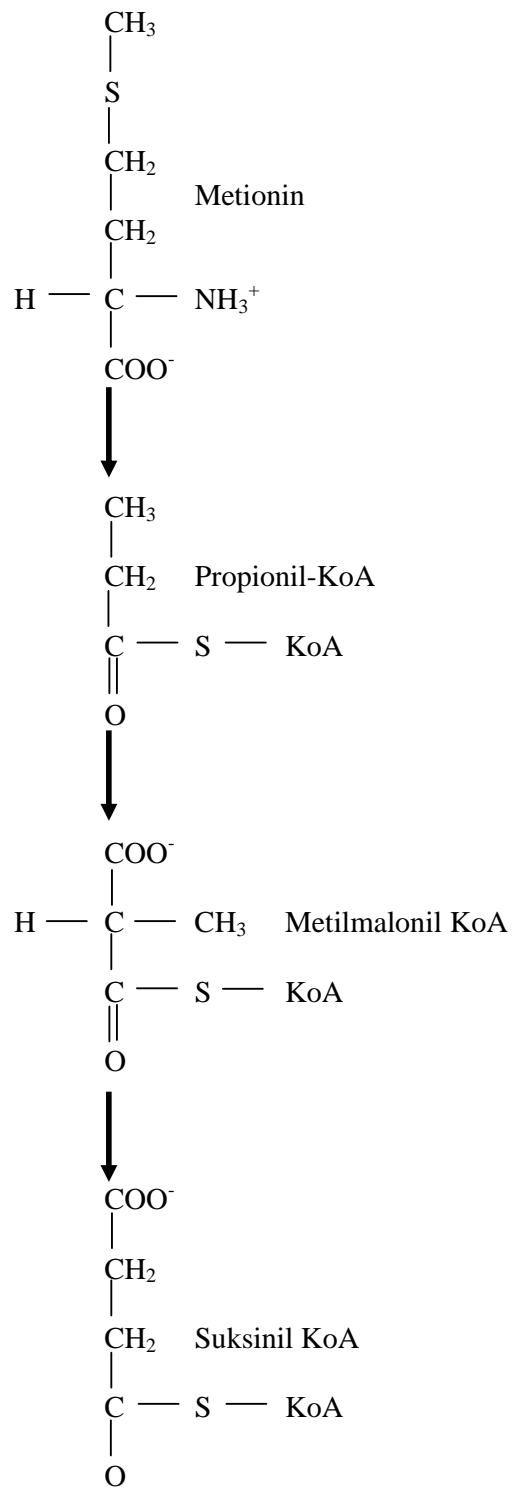
Sebagaimana diharapkan dari kemiripan strukturnya, katabolisme L-valin dan L-isoleusin pada awalnya memerlukan reaksi yang sama. Jalan ini kemudian memisah dan masing-masing rangka asam amino mengikuti jalan unik menjadi zat antara amfibolik (Gambar 2.45).



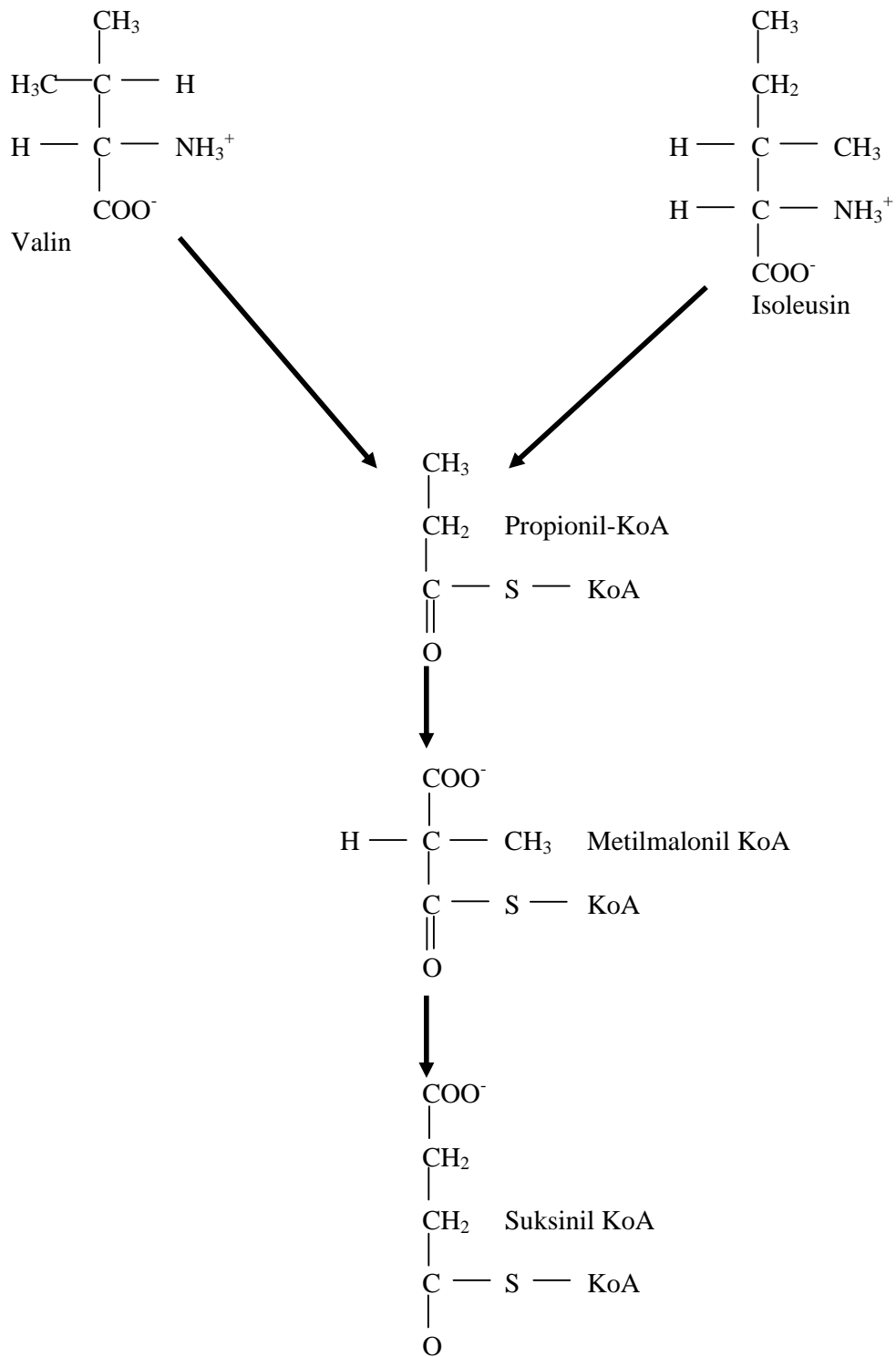
**Gambar 2.42. Konversi L-triptofan menjadi asetil koenzim A**



**Gambar 2.43. Katabolisme leusin**

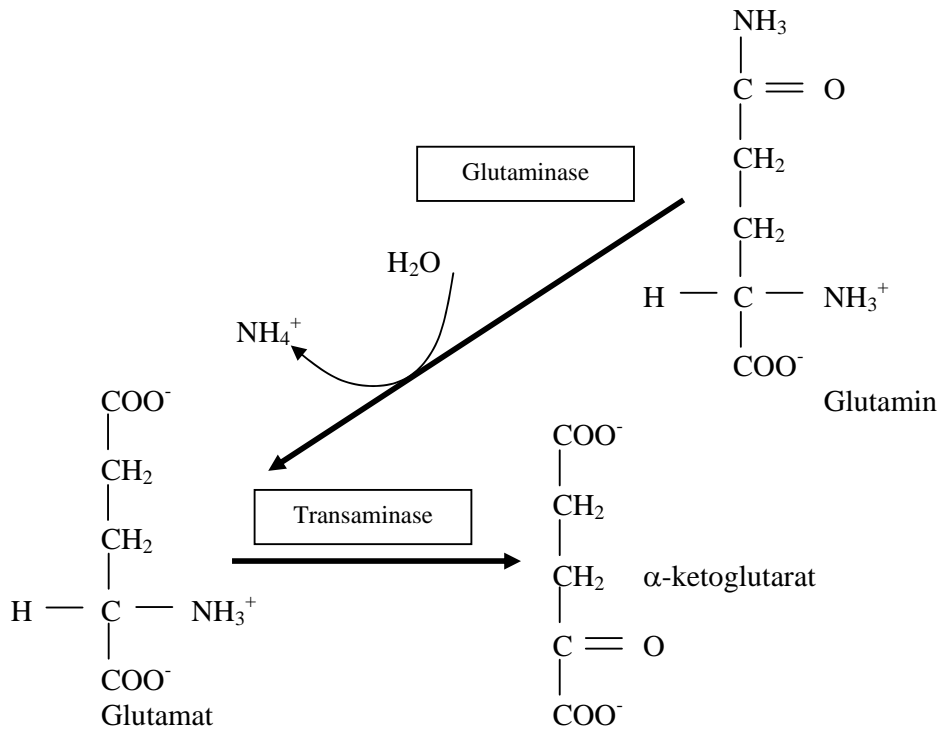


**Gambar 2.44. Konversi metionin menjadi suksinil KoA**



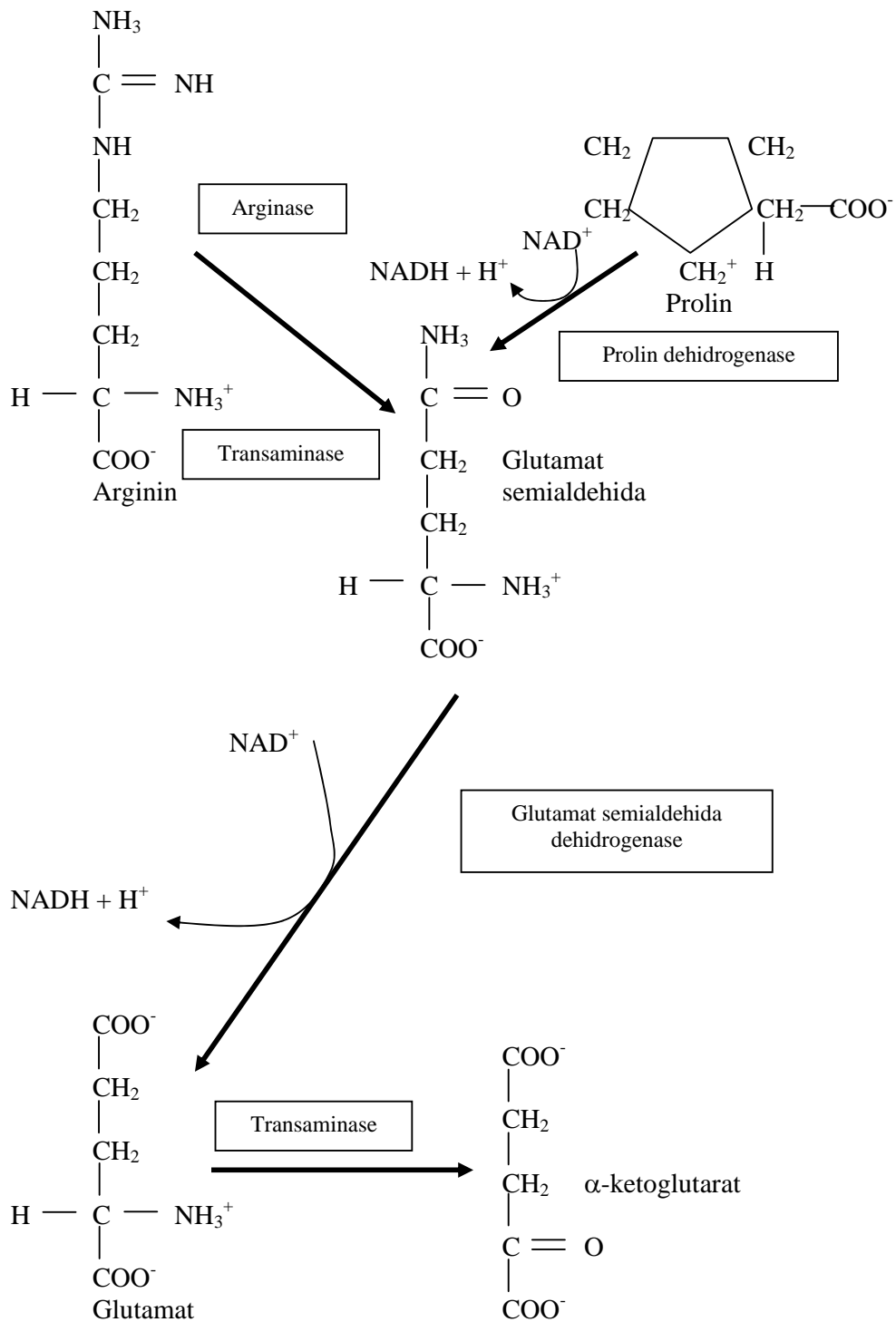
**Gambar 2.45. Konversi L-valin dan L-isoleusin menjadi suksinil KoA**

Kerangka karbon dari asam-asam amino glutamin, glutamat, arginin, histidin, dan prolin memasuki siklus Krebs melalui  $\alpha$ -ketoglutarat. Katabolisme glutamin dan glutamat berlangsung dengan bantuan enzim glutaminase dan transaminase (Gambar 2.46).



**Gambar 2.46. Katabolisme L-glutamin**

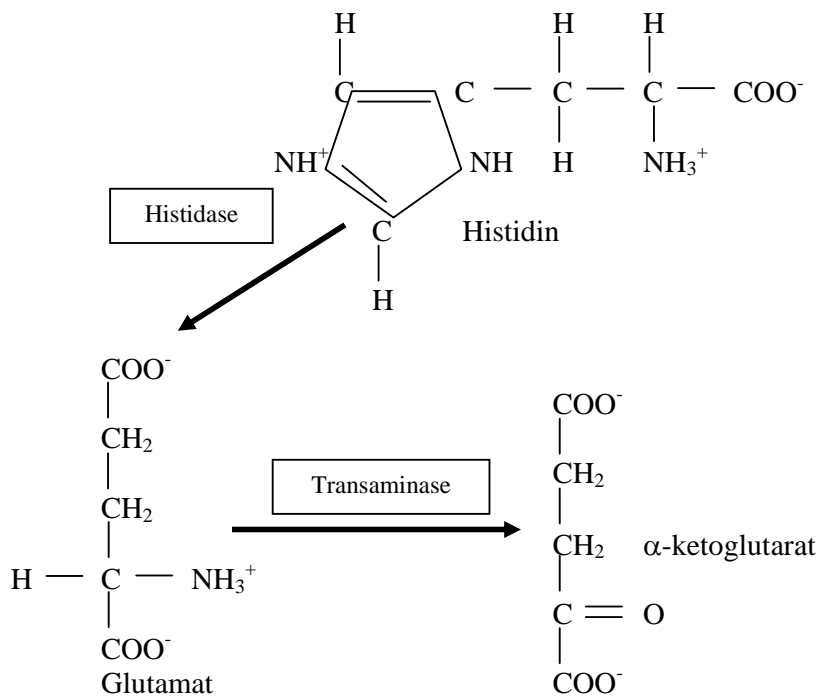
Prolin dioksidasi menjadi dehidroprolin yang dengan penambahan air akan membentuk glutamat  $\gamma$ -semialdehida. Selanjutnya dioksidasi menjadi glutamat dan ditransaminasi menjadi  $\alpha$ -ketoglutarat. Arginin dan histidin juga membentuk  $\alpha$ -ketoglutarat, satu karbon dan baik 2 (histidin) maupun 3 (arginin) pertama-tama harus dikeluarkan dari asam amino 6 karbon ini. Arginin hanya membutuhkan hanya satu langkah yaitu pengeluaran gugus guanidino secara hidrolisis yang dikatalisis oleh arginase yang menghasilkan ornitin. Ornitin mengalami transaminasi gugus  $\beta$ -amino, membentuk glutamat  $\gamma$ -semialdehida, yang dikonversi menjadi  $\alpha$ -ketoglutarat (Gambar 2.47).



**Gambar 2.47. Katabolisme L-prolin dan L-arginin**

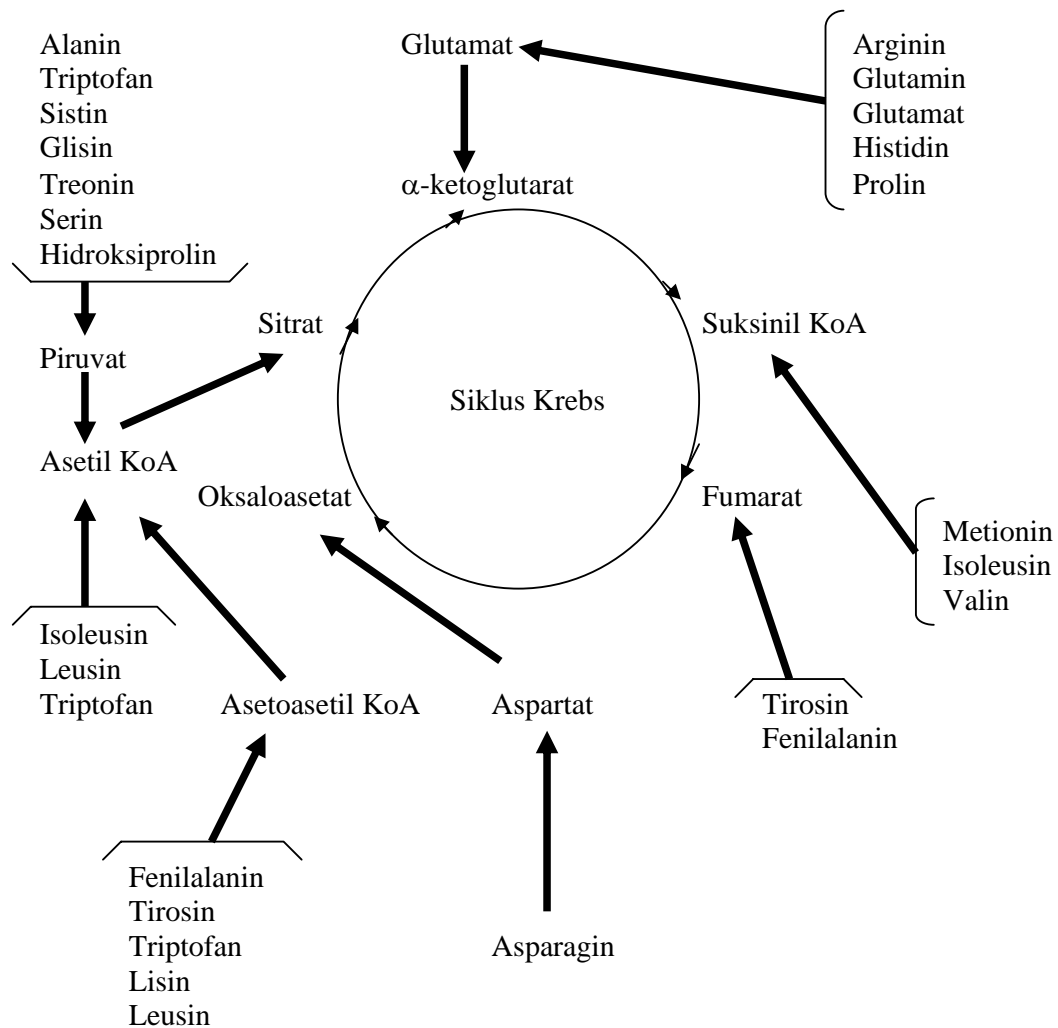


Bagi histidin, pengeluaran karbon dan nitrogen yang berlebih membutuhkan empat reaksi. Deaminasi histidin menghasilkan urokanat. Konversi urokanat menjadi 4-imidazol-5-propionat, yang dikatalisis oleh urokanase melibatkan penambahan H<sub>2</sub>O dan oksidasi-reduksi interna. Reaksi selanjutnya adalah 4-imidazol-5-propionat dihidrolisis menjadi N-formiminoglutamat yang diikuti oleh pemindahan gugus formimino pada karbon alfa ke tetrahidrofolat yang membentuk N<sup>5</sup>-formiminotetrahidrofolat. Kemudian dengan bantuan enzim glutamat formimino transferase, N<sup>5</sup>-formiminotetrahidrofolat diubah menjadi L-glutamat dan akhirnya menjadi oksaloasetat dengan bantuan enzim transaminase (Gambar 2.48).



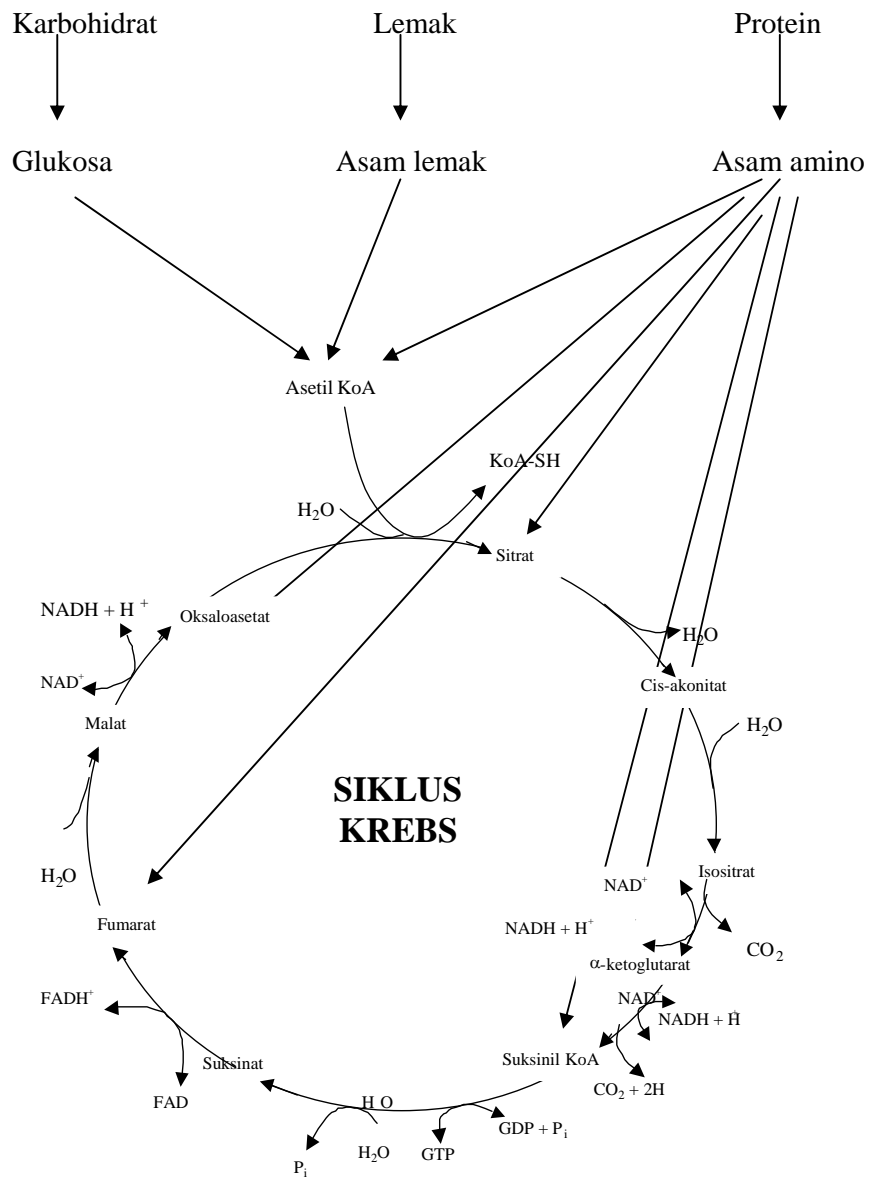
**Gambar 2.48. Katabolisme L-histidin**

Secara umum katabolisme masing-masing asam amino yang digunakan sebagai sumber energi dapat dilihat pada Gambar 2.49.



**Gambar 2.49. Katabolisme asam-asam amino menjadi energi**

Sebagaimana diketahui, sumber energi diperoleh dari karbohidrat, lemak dan protein. Karbohidrat melalui jalur glikolisis dan kemudian menuju siklus Krebs untuk menghasilkan energi. Lemak melalui jalur  $\beta$ -oksidasi dan kemudian menuju siklus Krebs untuk menghasilkan energi. Sementara itu protein harus mengalami deaminasi sebelum menjadi piruvat, asetil koenzim A ataupun langsung masuk ke siklus Krebs. Kesemua jalur tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.50.



Gambar 2.50. Metabolisme energi

## 2.5. Kebutuhan Energi pada Unggas

Sebagian besar kebutuhan energi digunakan untuk kebutuhan hidup pokok. Energi untuk hidup pokok meliputi kebutuhan untuk metabolisme basal dan aktivitas normal. Sebagai contoh, anak ayam dengan bobot badan 40 gram membutuhkan energi untuk hidup pokok sebesar 8 kkal per hari. Kebutuhan energi untuk hidup pokok harus terpenuhi dahulu sebelum unggas menggunakan energi untuk pertumbuhan.

Ayam yang mengkonsumsi pakan dengan energi tinggi akan memperlihatkan lemak karkas dalam jumlah yang lebih tinggi, dibandingkan dengan pakan yang mengandung energi rendah. Pada ayam petelur muda, strategi pemenuhan energi dilakukan dengan memberi energi dalam jumlah yang agak terbatas yaitu sebesar 2900 kkal/kg pakan dengan harapan untuk mengurangi pertumbuhan dan konsumsi makanan sampai anak ayam berumur 10 minggu. Anak ayam ini tetap mengandung lemak yang tipis pada bagian dinding perutnya. Berbeda dengan pemberian energi pada ayam broiler, di mana pada periode *starter* kebutuhan energi diberikan secara optimal sebesar 3200 kkal/kg dengan harapan akan tercapai pertumbuhan yang maksimal.

Pakan dengan tingkat energi yang tinggi akan menghasilkan daging yang penuh dengan lemak, sementara pakan yang tingkat energinya rendah akan menghasilkan daging rendah lemak. Lemak karkas pada ayam broiler dapat meningkat dengan cara mengurangi kadar protein pakan sedikit di bawah yang dibutuhkan untuk pertumbuhan maksimum dan meningkatkan energi dalam pakan sampai suatu tingkat yang mendekati tingkat energi yang paling tinggi. Hal ini menyebabkan broiler mengkonsumsi energi lebih banyak daripada yang dipergunakan untuk pertumbuhan. Kelebihan energi ini dapat diubah menjadi lemak tubuh, sehingga menghasilkan kondisi akhir yang siap untuk dipanen. Kebutuhan energi unggas dapat dilihat pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4. Kebutuhan energi pada unggas**

No	Unggas	Kebutuhan (kkal/kg)
1.	Ayam broiler	
	- <i>Starter</i>	3200
	- <i>Finisher</i>	3200
2.	Ayam petelur	
	- <i>Starter</i>	2900
	- <i>Grower</i>	2900
	- <i>Layer</i>	2900
3.	Itik	
	- <i>Starter</i>	2900
	- <i>Grower</i>	2900
	- <i>Breeder</i>	2900
3.	Puyuh	
	- <i>Grower</i>	3000
	- <i>Breeder</i>	3000

Ayam cenderung meningkatkan konsumsi kalau diberi pakan rendah energi. Pakan yang rendah energi biasanya bersifat amba. Dalam kondisi demikian, ayam akan kesulitan untuk memenuhi kebutuhan energinya, karena sebelum terpenuhi, ayam akan berhenti mengkonsumsi karena cepat kenyang. Apabila ayam terus kekurangan energi, maka ayam akan mengeluarkan simpanan energi dalam tubuh. Energi tersebut pertama dapat berasal dari glikogen yang tersimpan dalam jumlah sedikit dalam tubuh baik pada hati maupun darah, kalau masih kekurangan, maka akan diambilkan dari cadangan lemak tubuh. Fase terakhir kekurangan energi akan menyebabkan tubuh memobilisasi jaringan-jaringan protein untuk mempertahankan tingkat gula darah dan fungsi vital lainnya.