

BAHAN AJAR BIOKIMIA

Sistem energi untuk olahraga

Oleh: Cerika Rismayanthi, M.Or
FIK UNY

Seluruh sel-sel tubuh memiliki kemampuan mengkonversi makanan (dalam hal ini protein, lemak, dan karbohidrat) menjadi suatu bentuk energi yang digunakan secara biologi. Proses ini disebut bioenergetika, dan merupakan minat utama dalam bidang gizi olah raga atau fisiologi olahraga. Agar kita dapat berlari, melompat, dan berenang, maka sel-sel otot harus dapat terus menerus mengekstrak energi dari zat gizi makanan.

Sistem energi tubuh sangat penting untuk diketahui, agar kita dapat mengerti batas-batas aktivitas fisik. Ada tiga macam energi tubuh: (1) sistem phosphagen atau sistem ATP-Phosphocreatin, (2) sistem glikogen asam laktat atau sistem glikolisis, dan (3) sistem aerobik atau sistem oksidatif (fosforilasi oksidatif).

Sistem phosphagen dan sistem glikogen asam laktat dapat berjalan dengan tanpa adanya oksigen, karena itu dikatakan juga sebagai metabolisme anaerobik atau sistem anaerobik.

Sumber energi bagi aktivitas muskular adalah senyawa fosfat berenergi tinggi, yang dikenal dengan adenosin trifosfat (ATP). Walaupun ATP bukanlah satu-satunya molekul pembawa energi dalam sel, tetapi ATP merupakan sesuatu yang paling penting, sebab tanpa jumlah ATP yang cukup maka kebanyakan sel akan cepat mati.

Struktur ATP terdiri dari tiga bagian utama : a) adenine, b) ribosa, c) tiga buah fosfat, yang ketiganya berikatan bersama-sama. Pembentukan ATP terjadi dengan mengkombinasikan adenosine diphosphat (ADP) dan fosfat inorganik (Pi). Reaksi ini membutuhkan sejumlah energi. Beberapa energi itu disimpan dalam ikatan kimia yang menggabungkan ADP dan Pi, sehingga ikatan ini disebut ikatan berenergi tinggi. Apabila enzim ATPase memecah ikatan ini, maka sejumlah energi dibebaskan, dan energi ini dapat digunakan untuk melakukan kerja (dalam hal ini kontraksi otot).

Sistem Phosphagen

Cara memproduksi ATP yang paling sederhana dan paling cepat adalah melibatkan pemberian gugus fosfat dan energi ikatannya dari kreatin fosfat (CP) ke ADP untuk

membentuk ATP. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim kreatin kinase. ATP secara cepat dipecah menjadi ADP + Pi pada saat melakukan olahraga.

Kemudian ATP akan dibentuk kembali melalui reaksi kreatin fosfat. Tetapi, sel-sel otot hanya menyimpan sejumlah kecil CP, sehingga jumlah ATP total yang dapat dibentuk melalui reaksi ini terbatas. Kombinasi ATP dan CP yang disimpan disebut sistem ATP-CP atau sistem phosphagen. Pembentukan kembali CP membutuhkan sejumlah ATP dan hanya terjadi selama pemulihan dari exercise.

Sistem phosphagen ini dapat memberikan tenaga untuk kerja otot maksimal selama 10 sampai 15 detik, sehingga cukup untuk menyediakan energi selama berlari 100 meter.

Sistem Glikogen Asam Laktat

Jalur metabolik kedua yang mampu memproduksi ATP secara cepat tanpa melibatkan O₂ dikenal dengan glikolisis. Glikolisis melibatkan pemecahan glukosa atau glikogen membentuk dua molekul asam piruvat atau asam laktat. Secara sederhana, glikolisis merupakan suatu jalur anaerobik yang digunakan untuk mentransfer energi ikatan dari glukosa ke penggabungan kembali Pi pada ADP. Proses ini melibatkan sembilan langkah yang dikatalisis secara enzimatik dan terjadi di dalam sarcoplasma sel otot. Singkatnya, glikolisis menghasilkan dua molekul ATP (bersih) dan dua molekul asam piruvat atau laktat per molekul glukosa.

Kalau glikolisis diperhatikan lebih rinci. Pertama, walaupun hasil akhir adalah menghasilkan energi (proses *exergonic*), tetapi glikolisis harus “dipancing” dengan penambahan ATP pada dua langkah di awal jalur. Tujuan “pancingan” ATP adalah untuk menambahkan gugus fosfat (disebut fosforilasi) pada glukosa dan pada fruktosa-6-fosfat. Jika glikolisis dimulai dengan glikogen sebagai substrat, maka hanya dibutuhkan satu ATP (glikogen tidak membutuhkan fosforilasi dengan ATP, tetapi difosforilasi oleh fosfat inorganik). Selanjutnya, dua molekul ATP dihasilkan pada setiap dari dua reaksi yang terpisah dekat ujung jalur glikolisis, sehingga hasil bersih glikolisis adalah 2 ATP jika substratnya glukosa, dan 3 ATP jika substratnya glikogen.

Hidrogen sering dibebaskan dari substrat zat gizi pada jalur bioenergetika dan ditransport oleh molekul-molekul pembawa (*carrier molecules*). Dua molekul pembawa yang penting secara biologi adalah nikotiamide adenine dinukleotida (NAD) dan flavin adenine dinukleotida (FAD). NAD dan FAD mentransport hidrogen dan energi yang berhubungan dengannya digunakan untuk pembentukan ATP dalam mitokondria melalui

proses aerobik. Pada reaksi glikolisis, dua atom hidrogen harus dibebaskan dari gliseraldehida 3-phosphat, yang kemudian membentuk 1,3-difosfoglisarat. Penerima hidrogen pada reaksi ini adalah NAD. Di sini NAD menerima satu atom hidrogen, sedangkan hidrogen sisanya bebas di dalam larutan. Pada penerimaan hidrogen, NAD harus cukup tersedia untuk menerima atom hidrogen yang harus dibebaskan dari gliseraldehida 3-fosfat, jika glikolisis terus berlangsung. Bagaimana NAD dibentuk kembali dari NADH?. Ada dua cara sel menyimpan kembali NAD dari NADH. Pertama, jika oksigen cukup tersedia, hidrogen dari NADH dapat di shuttle ke dalam mitokondria sel dan dapat menyumbang pada produksi ATP aerobik. Kedua, jika oksigen tidak tersedia untuk menerima hidrogen dalam mitokondria, asam piruvat dapat menerima hidrogen untuk membentuk laktat. Enzim-enzim yang mengkatalisis reaksi ini adalah laktat dehidrogenase (LDH), dengan hasil akhir terbentuknya asam laktat dan pembentukan kembali NAD.

Oleh karena itu, alasan pembentukan asam laktat adalah mendaur ulang NAD (dalam hal ini NADH diubah menjadi NAD), sehingga glikolisis dapat berlanjut.

Karakteristik sistem glikogen asam laktat ini adalah ia dapat membentuk molekul ATP sekitar 2.5 kali lebih tinggi daripada kecepatan yang dapat dibentuk oleh mekanisme oksidatif dari mitokondria. Oleh karena itu, apabila sejumlah bahan ATP dibutuhkan untuk kontraksi otot selama jangka waktu tertentu (periode sedang), maka mekanisme glikolisis anaerobik dapat digunakan sebagai sumber energi yang cepat tersedia. Tetapi kecepatannya hanya setengah kecepatan sistem phosphagen.

Dibawah keadaan optimal, sistem glikogen-asam laktat dapat memberikan energi untuk aktivitas selama 30-40 detik disamping 10-15 detik yang diberikan oleh sistem phosphagen.

Sistem Aerobik

Produksi ATP secara aerobik terjadi di dalam mitokondria dan melibatkan interaksi dua jalur metabolik yang bekerjasama, yaitu: (1) siklus Krebs, dan (2) rantai transport elektron. Fungsi utama siklus Krebs adalah menyelesaikan oksidasi (melepaskan hidrogen) dari karbohidrat, lemak, atau protein dan menggunakan NAD dan FAD sebagai pembawa hidrogen (oksigen). Pengelepasan hidrogen ini penting karena hidrogen (berdasarkan elektron yang dia miliki) mengandung energi potensial. Energi ini dapat digunakan dalam rantai transport elektron untuk menggabungkan ADP + Pi membentuk ATP. Oksigen merupakan penerima (acceptor) hidrogen terakhir pada akhir rantai transport elektron dan kemudian

dibentuk air (dalam hal ini, $H_2 + O$ diubah menjadi H_2O). Proses produksi ATP secara aerobik dikenal dengan istilah *fosforilasi oksidatif*.

Siklus Krebs. Istilah ini diberikan setelah ahli biokimia Hans Krebs memelopori penelitian tentang jalur yang kompleks ini, yang pada akhirnya memberikan pengertian yang lebih jelas tentang jalur tersebut. Istilah lain bagi siklus Krebs adalah siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat. Untuk masuk ke dalam siklus Krebs perlu penyiapan molekul beratom karbon dua, yaitu asetil Coenzim A (asetil CoA). Asetil CoA dapat dibentuk dari pemecahan karbohidrat, protein atau lemak. Piruvat (molekul tiga atom karbon) dipecah membentuk asetil CoA (molekul dua atom karbon) dan karbon sisanya dilepas sebagai CO_2 . Selanjutnya, asetil CoA bergabung dengan asam sitrat (enam atom karbon). Kemudian terjadi serangkaian enam reaksi kimia, yang pada akhirnya terbentuk kembali asam oksaloasetat dan dua molekul CO_2 , sehingga jalur metabolik dapat berlangsung lagi (lihat Gambar 5). Untuk setiap molekul glukosa yang masuk jalur glikolisis dibentuk dua molekul piruvat, dan apabila tersedia oksigen (O_2) piruvat dikonversi menjadi dua molekul asetil CoA. Ini berarti setiap molekul glukosa menghasilkan dua putaran siklus Krebs.

Sekarang kita bahas lebih rinci siklus Krebs. Ingat bahwa fungsi utama siklus Krebs adalah membebaskan hidrogen dan energi yang berhubungan dengan hidrogen tersebut dari berbagai substrat yang terlibat dalam siklus. Setiap putaran siklus Krebs dibentuk tiga molekul NADH dan satu molekul $FADH_2$. Untuk setiap pasang elektron yang lewat melalui rantai transport elektron dari NADH ke oksigen, akan tersedia energi yang cukup untuk membentuk dua molekul ATP. Sehingga, dalam pembentukan ATP, energi $FADH$ tidak sekaya energi NADH.

Disamping produksi NADH dan $FADH$, siklus Krebs juga membentuk senyawa berenergi tinggi yang dapat mentransfer gugus fosfat terminalnya untuk membentuk ATP. Pembentukan langsung GTP dalam siklus Krebs disebut dengan fosforilasi taraf substrat, dan hanya menerangkan sejumlah kecil konversi energi dalam siklus Krebs. Hal ini karena kebanyakan hasil energi siklus Krebs (dalam hal ini NADH dan $FADH$) diperoleh pada rantai transport elektron yang membentuk ATP.

Sampai pada tahap ini, kita sudah memfokuskan pada peranan yang dimainkan oleh karbohidrat dalam memproduksi asetil CoA untuk masuk dalam siklus Krebs. Bagaimana peranan lemak dan protein pada metabolisme aerobik?. Lemak dipecah membentuk asam lemak dan gliserol. Asam-asam lemak ini kemudian menjalani rangkaian reaksi membentuk asetil CoA (disebut oksidasi beta) dan kemudian masuk siklus Krebs.

Walaupun oksidasi gliserol dapat dikonversi menjadi suatu intermediat glikolisis, tidak mungkin ini terjadi sedemikian besar dalam otot skeletal, sehingga gliserol bukanlah sumber energi yang penting selama exercise.

Seperti sudah dikatakan sebelumnya, protein bukanlah sumber bahan bakar utama selama exercise, karena protein menyumbang kurang dari 5-15 persen dari bahan bakar yang digunakan selama proses exercise. Protein dapat memasuki jalur bioenergetika dalam berbagai cara. Tetapi, tahap pertama adalah pemecahan protein menjadi asam amino. Apa yang terjadi kemudian tergantung pada asam amino mana yang dilibatkan. Sebagai contoh, beberapa asam amino dapat dikonversi menjadi glukosa atau asam piruvat, beberapa menjadi asetil CoA, dan yang lainnya menjadi senyawa intermediat siklus Krebs. Asam amino yang dikonversi menjadi glukosa dapat digunakan untuk menghasilkan energi.

Rantai Transport Elektron. Fosforilasi oksidatif atau produksi ATP secara aerobik terjadi di dalam mitokondria. Jalur yang bertanggungjawab untuk proses ini disebut rantai transport elektron atau pernafasan. Produksi ATP secara aerobik dimungkinkan karena suatu mekanisme yang menggunakan energi potensial yang tersedia pada pembawa hidrogen tereduksi, seperti NADH dan FADH untuk memfosforilasi kembali ADP menjadi ATP. Pembawa hidrogen tereduksi tidak langsung bereaksi dengan oksigen. Elektron-elektron yang mengandung energi ikatan dari atom-atom hidrogen dilewatkan melalui suatu rangkaian pembawa elektron yang dikenal sebagai sitokrom. Energi tersebut digunakan untuk memfosforilasi kembali ADP untuk membentuk ATP pada tiga tahapan yang berbeda.

Pembawa hidrogen yang membawa elektron ke rantai transport elektron berasal dari berbagai sumber. Ingat bahwa dua molekul NADH dibentuk per molekul glukosa yang dipecah melalui glikolisis. NADH ini di luar mitokondria dan hidrogennya harus ditransport melewati membran mitokondria melalui mekanisme jalur khusus. Tetapi, kebanyakan elektron yang masuk rantai transport elektron berasal dari NADH dan FADH yang dibentuk pada oksidasi siklus Krebs. Elektron-elektron dari NADH dan FADH dilewatkan melalui rangkaian senyawa yang melakukan oksidasi dan reduksi, dengan terjadinya sintesis ATP pada berbagai tempat di sepanjang perjalanannya. Kalau kita perhatikan, apabila NADH yang masuk rantai pernafasan, maka diperoleh tiga molekul ATP. Pada ujung rantai pernafasan, oksigen menerima elektron-elektron yang dilewatkan dan bergabung dengan hidrogen membentuk air. Jika oksigen tidak tersedia untuk menerima elektron-elektron tersebut, maka fosforilasi oksidatif tidak mungkin terjadi, sehingga pembentukan ATP dalam sel harus terjadi melalui metabolisme anaerobik.

Perhitungan ATP Aerobik. Sekarang kita dapat menghitung produksi ATP sebagai hasil dari pemecahan glukosa atau glikogen dalam keadaan aerobik. Ingat bahwa hasil bersih ATP pada glikolisis adalah dua ATP per molekul glukosa. Kemudian apabila tersedia oksigen dalam mitokondria, dua NADH yang dihasilkan melalui glikolisis dapat dimasukkan ke dalam mitokondria, dan dihasilkan enam ATP (lihat Tabel 1). Sehingga glikolisis dapat menghasilkan dua ATP secara langsung melalui fosforilasi taraf substrat dan enam ATP tambahan melalui energi yang dikandung pada dua molekul NADH.

Berapa banyak ATP yang dihasilkan sebagai hasil dari aktivitas oksidasi reduksi siklus Krebs?. Tabel 1 menunjukkan dua NADH dibentuk apabila asam piruvat dikonversi menjadi asetil CoA, menghasilkan enam ATP. Juga diperoleh dua GTP (sama dengan ATP) melalui fosforilasi tahap substrat, serta enam NADH dan dua FADH. Oleh karena itu, dihasilkan 24 ATP dari NADH ($8 \text{ NADH} \times 3 \text{ ATP} = 24 \text{ ATP}$) dan empat ATP dari FADH. Sehingga hasil ATP total dari pemecahan glukosa secara aerobik adalah 38 ATP. Sedangkan hasil ATP total dari pemecahan glikogen secara aerobik adalah 39 ATP, hal ini karena hasil bersih glikolisis dari glikogen adalah 3 ATP (1 ATP lebih banyak daripada glukosa).

Bagaimana efisiensi fosforilasi oksidatif sebagai suatu sistem yang mengkonversi zat gizi makanan menjadi energi yang dapat digunakan secara biologi? Hal ini dapat dihitung melalui rasio energi dari ATP yang diperoleh melalui respirasi aerobik dibagi dengan energi potensial total yang dikandung glukosa.

Tabel 1. Perhitungan ATP secara Aerobik dari Pemecahan Satu Molekul Glukosa.

Proses Metabolik	Produk Energi Tinggi	ATP dari fosforilasi oksidatif	Subtotal ATP	
Glikolisis	2 ATP	-	2 (anaerobik)	
	2 NADH	6	8 (aerobik)	
Asam Piruvat Menjadi asetil CoA	2 NADH	6	14	
Siklus Kerbs	2 GTP	-	16	
	6 NADH	18	34	
		2 FADH	4	38
Total	38 ATP			

Sebagai contoh, satu mol (1 mol adalah 1 gram berat molekul) ATP, apabila dipecah menghasilkan 7,3 Kal. Energi potensial yang dibebaskan dari oksidasi satu mol glukosa adalah 686 Kal. Maka, gambaran efisiensi respirasi aerobik sebagai berikut:

$$\frac{38 \text{ mol ATP/mol glukosa} \times 7.3 \text{ Kal/mol ATP}}{686 \text{ Kal/mol glukosa}} \times 100\% = 40\%$$

Oleh karena itu, efisiensi respirasi aerobik adalah sekitar 40 persen. Sisanya sebanyak 60 persen dibebaskan sebagai panas.

Sistem aerobik ini dapat menyediakan energi bagi tubuh kita dalam waktu yang tidak terbatas, selama zat-zat gizi tubuh masih tersedia. Dengan demikian, ia dapat digunakan untuk aktivitas olahraga yang memakan waktu banyak (misal olahraga *endurance* yang berlangsung lebih dari 1 jam).

Kalau kita ringkas dapat dilihat karakteristik berbagai sistem suplai energi pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik berbagai sistem suplai energi

Sistem energi	Kebutuhan oksigen	Reaksi kimia	Laju pembentukan ATP per detik	ATP yang dibentuk per molekul substrat	Kapasitas yang tersedia
ATP-PCr	tidak	PCr menjadi Cr	10	1	< 15 detik
Glikolisis	tidak	Glukosa atau glikogen menjadi laktat	5,0	2-3	~ 1 menit
Oksidatif (dari karbohidrat)	ya	Glukosa atau glikogen menjadi CO ₂ dan H ₂ O	2,5	36-39	~ 90 menit
Oksidatif (dari lemak)	ya	Asam lemak bebas dan trigliserida menjadi CO ₂ dan H ₂ O	1,5	>100	hari

Sumber : Kenney, et. al. (2012)

Jenis Olahraga dan Sistem Energi

Dengan mempertimbangkan intensitas dan lamanya aktivitas olahraga, maka kita dapat memperkirakan sumber energi yang digunakan oleh berbagai jenis olahraga. Pelari jarak 100 meter kelas dunia yang mencatatkan waktunya dibawah 10 detik hampir dipastikan semuanya menggunakan energi sistem phosphagen. Berbagai jenis olahraga menurut sumber energinya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sistem Energi yang Digunakan pada Berbagai Jenis Olahraga

Sistem energi	Jenis Olahraga
Sistem phosphagen (hampir semuanya)	Sprint 100 m Lompat tinggi/jauh Angkat berat Menyelam Lari cepat pada main bola
Sistem phosphagen dan glikogen - asam laktat	Lari cepat 200 meter Basket Baseball Lari cepat hoki es
Sistem glikogen asam laktat (hampir semuanya)	Lari cepat 800 meter Berenang 200 meter Skating 1500 meter Bertinju Dayung 200 meter Lari 1500 meter Lari 1 mil Renang 400 meter
Sistem aerobik	Skating 10.000 meter Main ski Lari maraton (26.2 mil, 42.2 Km) Jogging

Daftar Pustaka

Kenney WL, Wilmore JH, Costill DL. 2012. Physiology of sport and exercise. 5th ed. Champaign : Human Kinetics.

Kraemer WJ, Fleck SJ, Deschenes MR. 2012. Exercise physiology : integrating theory and application. 1st ed. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins.

Lanham-New SA, Stear SJ, Shirreffs SM, and Collins AL (Eds). 2011. Sport and exercise nutrition. West Sussex : Wiley-Blackwell

Diposkan oleh [Hadi Riyadi](#) di [Sabtu, Januari 12, 2013](#)