

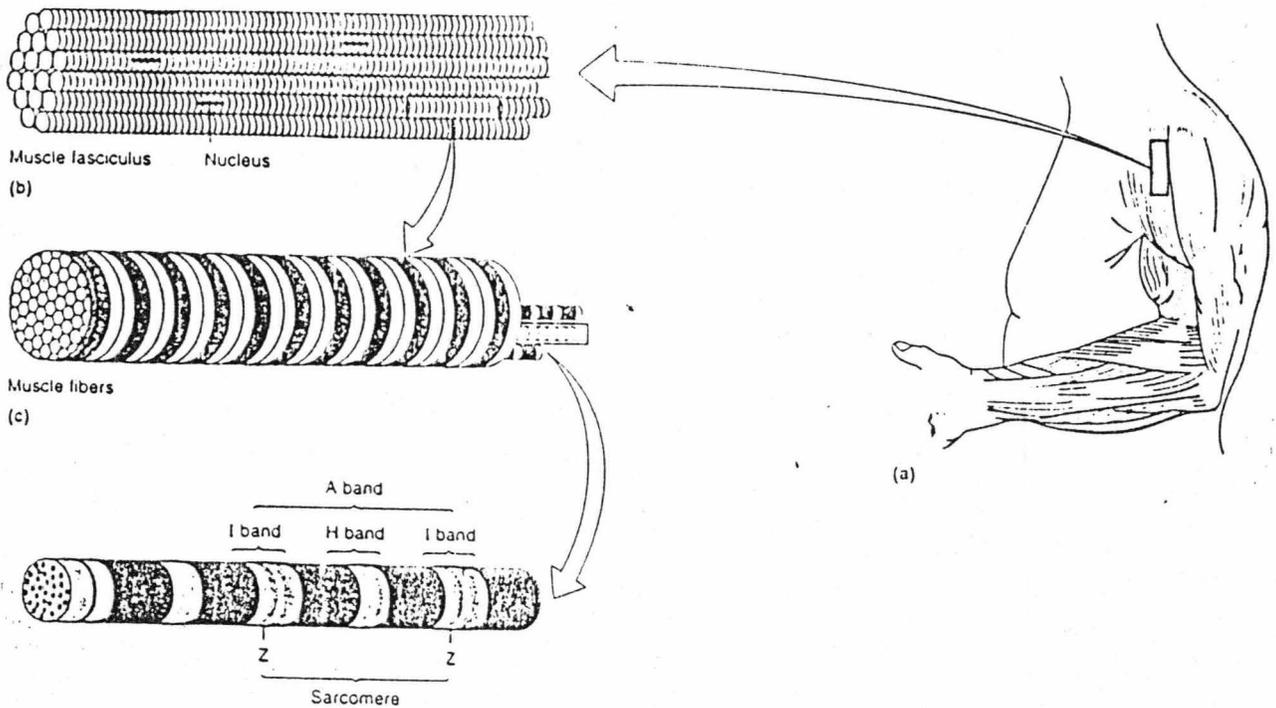
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Otot Rangka (Skelet)

Sel otot seperti halnya dengan sel saraf dapat dirangsang secara kimia, listrik dan mekanik untuk menimbulkan potensial aksi. Otot pada tubuh manusia terbagi menjadi tiga jenis, yaitu: otot rangka, otot polos dan otot jantung. Uraian di bawah ini hanya akan dibatasi pada otot kerangka saja.

Otot rangka merupakan massa yang besar dari otot somatik dan mempunyai garis-garis melintang yang nyata, dan tidak akan berkontraksi apabila tidak mendapat rangsangan dari saraf. Otot rangka terdiri dari sejumlah serabut-serabut otot yang mempunyai diameter berkisar 10 sampai 80 mikron . Setiap serabut otot tersebut terdiri dari rangkaian subunit yang lebih kecil (gambar 2.1). Pada sebagian besar otot, serabut-serabutnya membentang diseluruh panjang otot. Fungsi utama dari otot rangka adalah untuk melakukan kontraksi yang menjadi dasar utama dari gerakan tubuh. Aktifitas otot rangka yang terdapat diberbagai bagian tubuh dikoordinasikan oleh susunan saraf sehingga membentuk suatu gerakan yang harmonis serta letak posisi tubuh yang tepat. Setiap serabut otot rangka mengandung beberapa ratus sampai beberapa ribu miofibril. Tiap miofibril yang terletak berdampingan, mempunyai filamen miosin kira-kira 1500, dan 3000 filamen aktin yang merupakan molekul protein polimer besar yang bertugas untuk terjadinya kontraksi otot. (Fox, 1993; Guyton, 1966).



Gambar 2.1 Struktur otot rangka (skelet)
(Devlin, 1992)

Filamen-filamen ini dapat dilihat pada mikroskop elektron. Filamen yang tebal adalah miosin dan filamen yang tipis adalah aktin. Filamen miosin dan filamen aktin berselang seling sehingga memberi gambaran pita terang dan gelap. Pita-pita yang terang yang hanya mengandung filamen aktin disebut pita I (I band) karena mereka terutama bersifat isotropik terhadap cahaya yang dipolarisasikan. Pita-pita yang gelap yang mengandung filamen miosin disebut pita A (A band) karena mereka bersifat anisotropik terhadap cahaya yang dipolarisasi-

kan. Penonjolan-penonjolan kecil disamping filamen miosin disebut jembatan penyeberangan (*cross-bridges*), mereka menonjol dari permukaan sepanjang filamen miosin, kecuali pada bagian tengahnya. Interaksi antara jembatan penyeberangan dan filamen aktin menyebabkan kontraksi otot (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Filamen aktin melekat pada cakram Z (*Z discus*), dan filamen-filamen aktin tersebut memanjang pada salah satu sisi cakram Z untuk bertautan dengan filamen miosin. Cakram Z yang terdiri dari beberapa filamen protein yang berbeda dari filamen miosin dan filamen aktin, juga berjalan dari miofibril ke miofibril, dan melekatkan miofibril satu sama lainnya melalui serabut otot. Oleh karena itu seluruh serabut otot mempunyai pita yang terang dan gelap seperti juga yang terdapat pada tiap-tiap miofibril. Pita-pita ini memberi corak bergaris pada otot rangka (Vander, 1990).

Bagian miofibril yang terletak antara cakram Z yang berurutan dinamakan sarkomer yang merupakan unit fungsional dari miofibril. Bila serabut otot dalam keadaan normal panjang maksimal sarkomer kira-kira 2,0 mikron. Pada ukuran panjang ini, filamen aktin dan miosin akan overlap antara satu sama lainnya. Bila sebuah serabut otot diregangkan melebihi panjang istirahatnya, ujung-ujung filamen aktin akan tertarik saling menjauh menyebabkan daerah terang pada pusat pita A. Daerah terang ini dinamakan daerah H (zona H) gambar 2,

yang merupakan daerah dimana pada keadaan relaksasi filamen aktin tidak overlap dengan filamen miosin. Jadi pada waktu terjadi kontraksi daerah H tidak kelihatan. Pada bagian tengah dari daerah H terdapat garis M (M line) yang dibentuk oleh filamen miosin pada bagian tengah daerah H (Guyton, 1996).

2.1.1 Miosin (*filamen tebal*)

Miosin merupakan molekul panjang dengan dua kepala globuler pada sebuah ujungnya. Miosin terdiri dari enam rantai polipeptida, dua rantai berat sekitar 230.000 mol wt; dan dua pasang rantai ringan yang berat molekulnya sekitar 20.000 mol wt; setiap rantai berat berhubungan dengan pasangan rantai ringan yang berbeda. Rantai ringan adalah protein seperti kalmodulin yang mengikat kalsium. Rantai ringan mengikat rantai berat di sekitar kelompok kepala miosin (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).

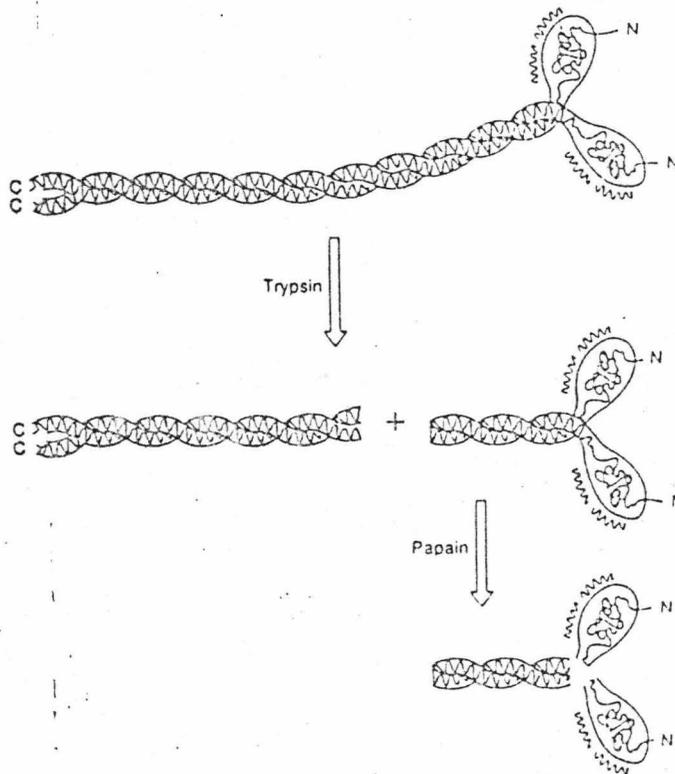
Bagian ekor miosin adalah ujung karboksil rantai. Miosin tergulung dengan sendirinya dalam susunan alfa-heliks yang berbentuk spiral (gambar 2.2). Perlakuan dengan tripsin menyebabkan pembelahan bagian ekor sekitar sepertiga dari titik temu (junction) untuk memproduksi meromiosin berat (kelompok kepala dan ekor pendek). Meromiosin berat ini mempunyai ekor seperti batang dan dua kepala globuler, tidak mengumpul tetapi mempunyai aktivitas ATPase dan mengikat ke rantai rin-

gan. Meromiosin berat ini dapat dipisahkan dengan perlakuan papain untuk menghasilkan dua subfragmen globuler yang identik (dinamakan S1) dan subfragmen berbentuk batang (dinamakan S2). Sedangkan meromiosin ringan adalah suatu batang alfa-heliks yang panjangnya 850 amstrong, yang mengumpul untuk membentuk filamen-filamen (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).

Miosin adalah elemen besar yang penting dari elemen kontraksi, membentuk agregat simetris sekitar garis M dari daerah H di sarkomer. Supaya hal ini terjadi, bagian ekor miosin harus digabungkan dalam pola paralel dan pola anti paralel, juga kelompok kepala pada masing-masing ujung harus dipolarisasikan dalam arah yang sama, yaitu jauh dari pusat (Alberts, 1989).

Bagian kepala globuler dari miosin merupakan unit kerja. Miosin memuat aktivitas ATPase yang menyediakan energi untuk proses kontraksi, dan memuat tempat pengikatan aktin. ATP tidak menyediakan energi secara langsung untuk kontraksi, tetapi pengikatannya pada miosin dan hidrolisisnya dengan miosin ATPase menginduksi perubahan konformasi (penyesuaian) di kelompok kepala secara reversibel yang memungkinkan pengikatan dan pemutusannya dari aktin selama proses penarikan garis-garis Z kearah pusat sarkomer. Konformasi miosin yang memiliki tempat pengikatan ATP mempunyai afinitas (daya gabung) untuk aktin yaitu dari konformasi miosin yang tidak memiliki tempat pengikatan ATP, sehingga proses

transduksi energi kimia untuk bekerja secara mekanis bergantung pada peristiwa dari perubahan konformasi protein (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).



Gambar 2.2 Filamen miosin (Devlin, 1992)

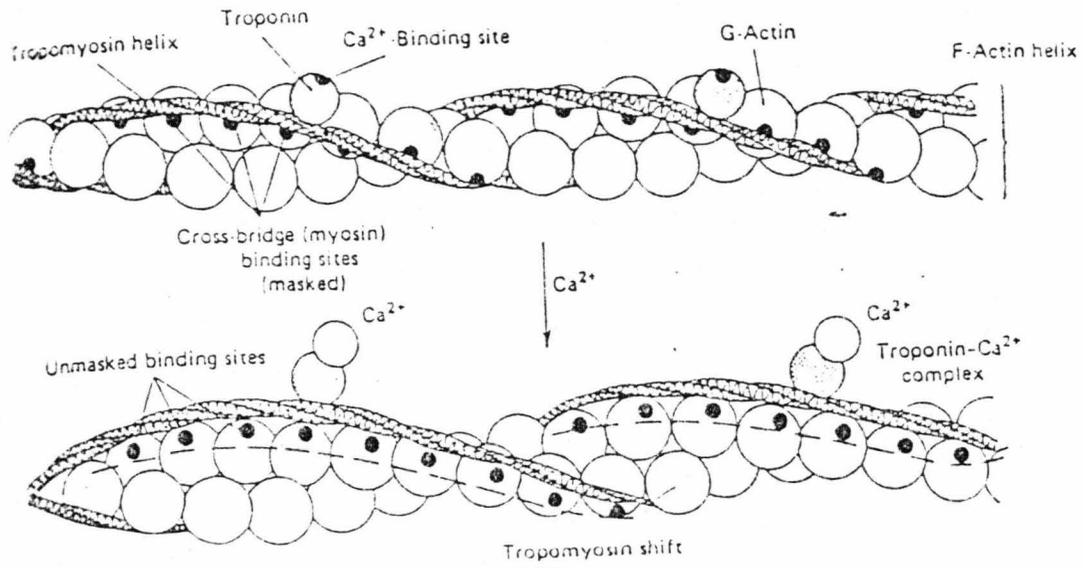
2.1.2 Aktin (*filamen tipis*)

Aktin merupakan protein penting dari filamen tipis yang tersusun sekitar 20 sampai 25 persen protein otot. Aktin disintesa sebagai protein globuler. Aktin yang amat kompleks terdiri dari tiga komponen yang berbeda; aktin, tropomiosin, dan troponin. Tulang punggung filamen aktin adalah suatu molekul protein F-aktin (fibrous-aktin) untiran ganda. Kedua untiran membelit dalam suatu heliks dengan cara yang sama seperti molekul miosin.

Setiap untai dari heliks F-aktin ganda terdiri dari molekul G-aktin yang dipolimerisasikan yang masing-masing mempunyai berat molekul 42.000. Terdapat kurang lebih 13 molekul pada setiap perputaran dari setiap untai heliks. Banyak hal yang penting tentang agregasi G-aktin untuk membentuk F-aktin. G-aktin mengandung tempat pengikatan spesifik untuk ATP dan tempat pengikatan berafinitas tinggi untuk ion-ion besi bivalen (misalnya: ion Mg). Ion Mg merupakan kation paling penting secara fisiologik, tetapi ion Ca juga mengikat dengan kuat dan berkompetisi dengan ion Mg untuk tempat pengikatan kuat yang sama (Alberts, 1989; Vander, 1990).

2.1.3 Tropomiosin

Tropomiosin adalah protein tambahan pada filamen aktin yang merupakan polimer. Tropomiosin ini berhubungan dengan filamen F-aktin. Ia terdiri dari dua rantai (untiran) peptida alfa-heliks (berbentuk spiral) yang berbeda, saling menggulung dalam konfigurasi kepala-ekor. Tropomiosin terkait dengan filamen tipis untuk seluruh panjangnya. Namun demikian setiap molekul tropomiosin mengikat dengan kuat pada tujuh monomer dalam molekul F-aktin. Ia juga bisa membantu menstabilkan dan memperkuat filamen serta berkompetisi memperebutkan tempat pengikatan miosin selama tahap relaksasi dari kontraksi (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).

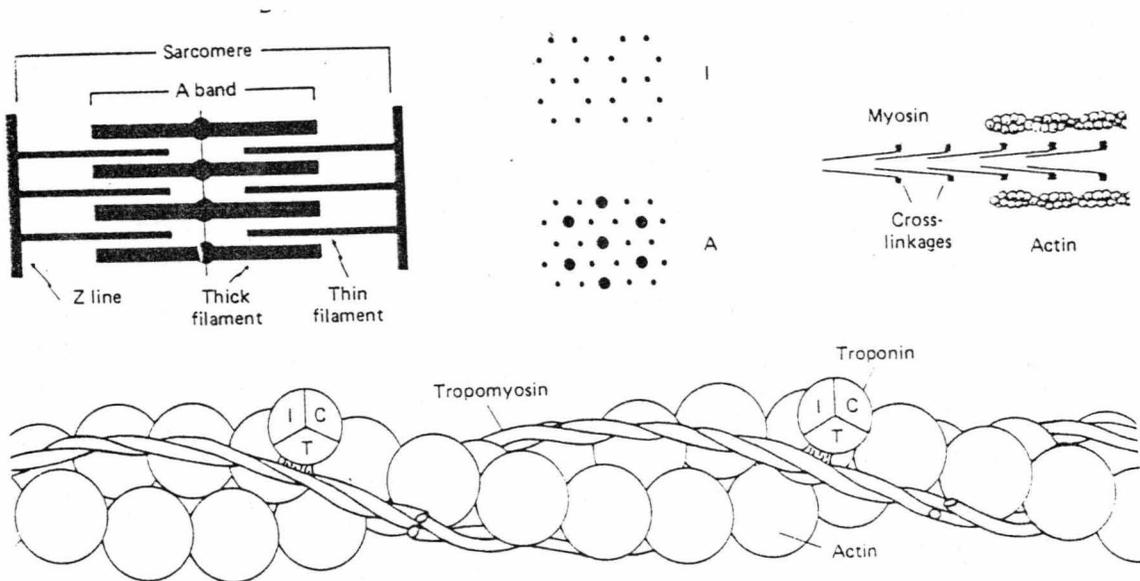


Gambar 2.3 Filamen aktin (Brooks, 1984)

2.1.4 Troponin

Sebuah kompleks yang terdiri dari tiga molekul protein globuler yang disebut troponin, melekat kira-kira dua pertiga panjang setiap molekul tropomiosin. Protein globuler troponin I (Tn-I) mempunyai afinitas yang kuat dalam penghambatan aktin pada miosin waktu relaksasi (istirahat). Protein globuler troponin T (Tn-T) mengikat pada tropomiosin, dan yang ketiga adalah troponin C (Tn-C) terikat pada ion-ion kalsium. Kompleks ini melekatkan tropomiosin pada aktin. Interaksi tropo-

nin terhadap ion-ion kalsium ini menginduksi perubahan konformasi tropomiosin yang menyebabkan proses pengikatan aktin-miosin dan menimbulkan proses kontraksi dengan memungkinkan miosin bebas mengikat pada aktin (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).



Gambar 2.4 Tropomiosin dan troponin (Ganong, 1981)

2.1.5 Tipe serabut otot rangka

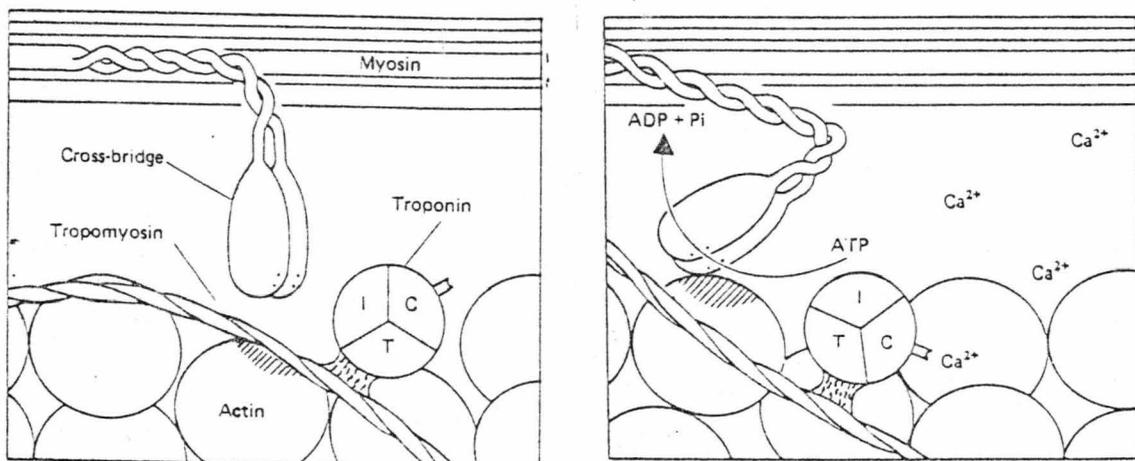
Walaupun sifat umumnya sama, tetapi tidak semua otot bergaris itu tepat sama. Serat otot jantung berbeda dengan serat otot rangka. Para ahli anatomi dan histologi membagi otot rangka menjadi dua tipe, yaitu tipe serat otot merah mempunyai kapasitas penggunaan oksigen yang besar dan menggunakan baik lemak maupun karbohidrat sebagai sumber bahan bakar. Warna merah disebabkan

kadar mioglobin yang tinggi untuk pengangkutan dan penggunaan oksigen. Kontraksi pada serat merah bersifat lambat (*slow-twitch*) tetapi tetap, sehingga dapat mempertahankan ketegangan untuk waktu yang lama. Sedangkan serat otot putih hanya menggunakan glikogen dan glukosa dan ini sesuai dengan warna dominan yang terkandung didalam serat otot putih. Sifat kontraksi dari otot putih adalah cepat (*fast-twitch*), sehingga dapat mempertahankan ketegangan yang kuat dan cepat (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Gollnick (1973), mengemukakan bahwa pembagian tipe serabut otot ada beberapa macam; yaitu tipe I untuk aktivitas lambat atau *slow-twitch* (ST) yang disebut juga kegiatan aerobik atau yang lebih dikenal dengan daya tahan. Sedangkan tipe II untuk aktivitas anaerobik yang memerlukan reaksi yang cepat dan singkat yang disebut otot *fast-twitch* (FT). Lebih terperinci Jansson (1977), membagi serabut otot FT menjadi FTa (IIa; *fast-oxidative-glycolytic* = FOG), FTb (IIb; *fast-glycolytic* = FG), dan FTc (IIc; *intermedia*). Dari hasil pembagian ini sangat penting dalam fungsi dari masing-masing serabut otot rangka tersebut. Jenis tipe serabut otot rangka itu akan lebih jelas bagaimana prinsip-prinsip energi yang dihasilkan oleh ST (oksidatif), FTa (oksidatif-glikolitik), dan FTb (glikolitik). Sistem ini merupakan suatu metabolisme di dalam otot (Vander, 1990).

2.2 Mekanisme Kontraksi Otot

Huxley (1969) mengajukan teori *sliding filament*, dengan menggunakan mikroskop elektron dan didukung oleh data biokimia, maka teori *sliding filament* dikembangkan menjadi *cross-bridges* dengan aktin monomer. Menurut Huxley pada saat kontraksi *cross-bridge*, pertama-tama akan menempel pada filamen tipis dan menariknya ke arah pusat dari pita A, kemudian ia akan terlepas dari filamen tipis sebelum kembali bergerak ke arah posisi semula. Mekanismenya seperti roda bergigi yang bergerak ke satu arah dan oleh sebab itu teori ini disebut juga *ratchet theory*. *Cross-bridge* terdiri dari kepala globular dari miosin dan disokong oleh ekor alfa-helik (*alpha-helical tail*) yang terletak dalam posisi sejajar sepanjang filamen miosin dimana mereka melekat. Semua *cross-bridge* yang terletak pada bagian tengah dari pita A mempunyai polaritas yang sama dan berlawanan dengan polaritas *cross-bridge* yang terletak pada setengah dari pita A bagian lainnya, sehingga pada waktu kontraksi *cross-bridge* pada ke dua bagian ini akan menarik filamen aktin ke arah tengah dari pita A (Vander, 1990; Guyton, 1996).



Gambar 2.5 Mekanisme kontraksi otot rangka (Ganong, 1981)

Jika tidak ada troponin-tropomiosin kompleks, filamen aktin akan melekat erat dengan filamen miosin dengan adanya ion Mg dan ATP. Namun jika terdapat troponin-tropomiosin kompleks maka interaksi antara filamen aktin dan miosin tidak terjadi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada keadaan relaksasi bagian aktif dari filamen aktin tertutup oleh troponin-tropomiosin kompleks (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Ion Ca dalam jumlah besar akan menghambat efek inhibisi troponin-tropomiosin kompleks. Ion Ca akan terikat dengan Tn-C, dimana tiap molekul Tn-C mengikat 4 ion Ca. Terikatnya ion Ca dengan Tn-C akan mengubah troponin-tropomiosin kompleks, dimana ikatan Tn-I dengan aktin akan melemah. Perubahan ini menyebabkan tropomiosin akan bergerak ke arah lateral, dan bagian aktif dari aktin menjadi bebas, sehingga kepala molekul miosin dapat melekat pada bagian aktif dari aktin dan membentuk cross-bridges sehingga aktin dan miosin akan bergeser satu sama lainnya dan terjadilah kontraksi (Vander, 1990; Guyton, 1996).

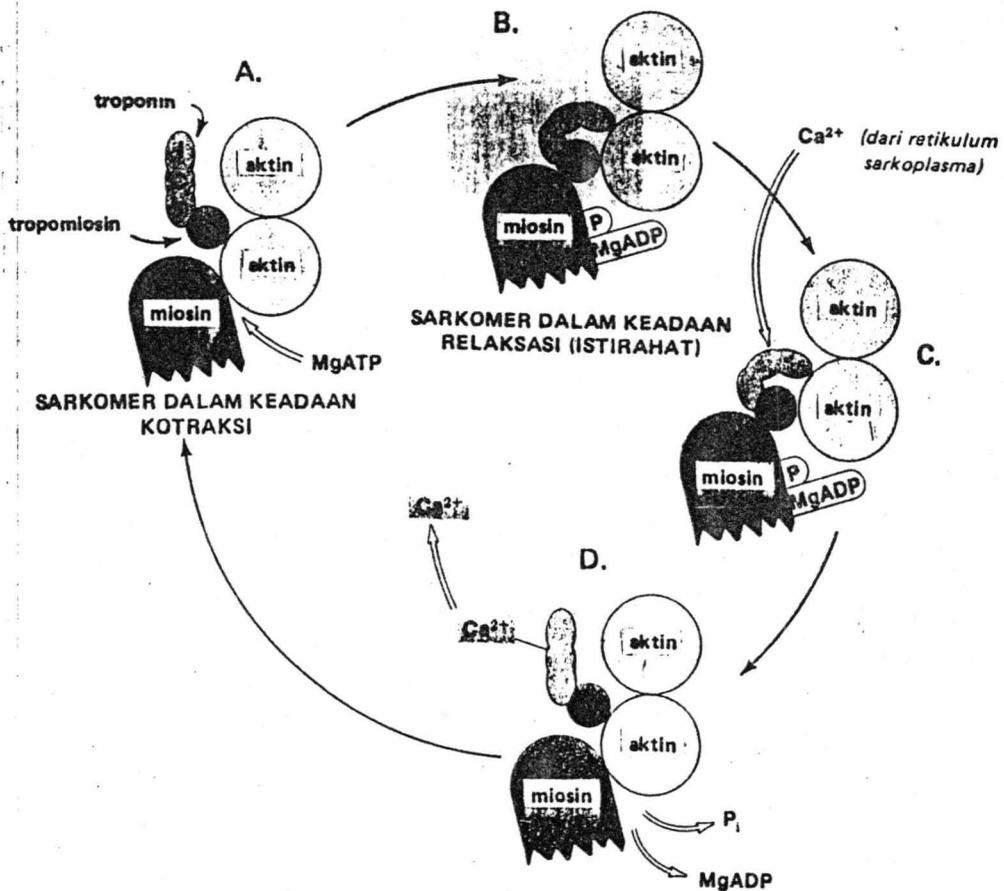
2.2.1 Proses kontraksi otot

Peristiwa utama pada kontraksi otot (gambar 2.6) adalah tonjolan miosin yang berada pada konformasi energi-rendah, reaksi dengan ATP (sebagai kompleks Mg) menyebabkan perubahan ke konformasi relaksasi dengan energi-tinggi. Reaksi yang terjadi ini menyangkut proses fosforilasi tonjolan miosin, dan MgADP yang terbentuk tetap terikat pada miosin bersama-sama dengan fosfat pada pembentukan konformasi energi-tinggi (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Bila terjadi rangsangan saraf ion Ca dikeluarkan dari retikulum sarkoplasma dan diikat oleh troponin-tropomiosin, menyebabkan letak kompleks berubah sehingga aktin dapat berikatan dengan miosin. Pengikatan tonjolan

miosin dengan aktin akan melepaskan gugus fosfat dan ADP. Lepasnya fosfat dan ADP menyebabkan tonjolan miosin melipat kembali ke konformasi energi rendah, dan bersamaan dengan itu menarik aktin hingga otot berkontraksi. Kedua tonjolan molekul miosin bekerja bersamaan, masing-masing dengan suatu butiran aktin. Setelah kontraksi, ion Ca akan lepas kembali, dan MgATP akan diikat kembali untuk memulai lagi siklus kontraksi-relaksasi, yang akan terulang selama kadar ion Ca masih tinggi (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Bila rangsangan saraf berhenti, ion Ca akan kembali memasuki retikulum sarkoplasma, kadar dalam sitoplasma menjadi rendah untuk diikat oleh troponin, dan kompleks troponin-tropomiosin kembali keposisi penghambatan. Aktin dan miosin tidak lagi berinteraksi, dan tonjolan miosin berada dalam konformasi relaksasi. Suatu hal yang penting pada kontraksi otot adalah penyediaan ion Ca dalam retikulum endoplasma dengan kadar yang jauh lebih tinggi daripada di dalam sitoplasma di sekitar filamen kontraksi. Rangsangan kontraksi menyangkut pembukaan saluran sehingga ion Ca dapat keluar dengan cepat. Fase pemulihannya setelah kontraksi meliputi pemompaan kembali ion Ca ke dalam retikulum endoplasma. Mekanismenya memerlukan ATP seperti pada pompa ion Na dan ion K. Ion Ca dimasukkan ke retikulum endoplasma sedangkan ion Mg di keluarkan (Vander, 1990; Guyton, 1996).



Gambar 2.6 Proses kontraksi otot (McGilverly, 1983)

a. Ion kalsium

Hampir seluruh membran sel tubuh mempunyai pompa Ca yang mirip dengan pompa Na. Pompa Ca ini akan memompakan ion Ca dari bagian dalam ke bagian luar membran sel sehingga menimbulkan perbedaan ion Ca kira-kira 10.000 kali lipat. Saluran Ca permeabel

terhadap ion Na seperti halnya terhadap ion Ca. Bila saluran Ca terbuka maka ion Ca dan Na, keduanya akan mengalir masuk ke dalam serabut. Oleh karena itu saluran ini juga disebut saluran Ca-Na. Saluran Ca-Na sangat lambat menjadi aktif, bila dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan untuk mengaktifkan saluran Na. Oleh sebab itu saluran Ca-Na sering juga disebut saluran lambat, dan berlawanan dengan saluran Na normal yang disebut saluran cepat. Konsentrasi ion Ca di dalam cairan intersisial mempunyai pengaruh yang besar terhadap besarnya voltase dimana saluran Na menjadi aktif. Bila di dalam cairan ini terjadi kekurangan ion Ca maka seluruh saluran Na menurun mendekati kenaikan potensial membran di atas nilai istirahat normal, sehingga serabut saraf sangat mudah dirangsang. Sarkoplasma yang banyak mengandung ion Ca dalam konsentrasi yang sangat tinggi. Ion Ca akan dilepas dari retikulum sarkoplasma bila T-tubulus yang berdekatan dirangsang. Potensial aksi dari T-tubulus menyebabkan mengalirnya arus melalui sisterna. Aliran arus ini menyebabkan pelepasan ion Ca dengan kecepatan tinggi, hal ini disebabkan terbukanya saluran Ca dan saluran Na. Ion Ca yang dilepaskan dari retikulum sarkoplasma berdifusi ke miofibril yang berdekatan dimana ion Ca tersebut berikatan kuat dengan troponin C (Tn-C). Ion Ca

dalam jumlah besar akan menghambat efek inhibisi troponin-tropomiosin kompleks. Ion Ca akan terikat dengan Tn-C, dimana tiap molekul Tn-C mengikat 4 ion Ca. Terikatnya ion Ca dengan Tn-C akan mengubah konfigurasi troponin-tropomiosin kompleks, dimana ikatan Tn-I dengan aktin akan melemah. Perubahan ini menyebabkan tropomiosin akan bergerak ke arah lateral, dan bagian aktif dari aktin menjadi bebas sehingga kepala molekul miosin dapat melekat pada bagian aktif dari aktin dan membentuk cross-bridges yang menyebabkan aktin dan miosin akan bergeser satu sama lainnya dan terjadilah kontraksi (Vander, 1990; Guyton, 1996).

b. Perubahan kalsium

Kontraksi otot rangka ditimbulkan oleh impuls saraf yang ditransmisikan sepanjang titik temu neuromuskuler melalui intervensi neurotransmitter asetilkolin. Interaksi asetilkolin dengan reseptor pada postsinaptik membran, menentukan gerakan sederhana peristiwa yang menyebabkan meningkatnya konsentrasi ion Ca di dalam sarkomer, interaksi ion Ca dengan Tn-C akibat proses kontraksi. Proses ini terjadi dengan cepat yang menyebabkan terjadinya kontraksi secara bersamaan atau simultan disemua sel otot yang terstimuli (Vander, 1990; Guyton, 1996).

c. Ion kalsium merangsang kontraksi

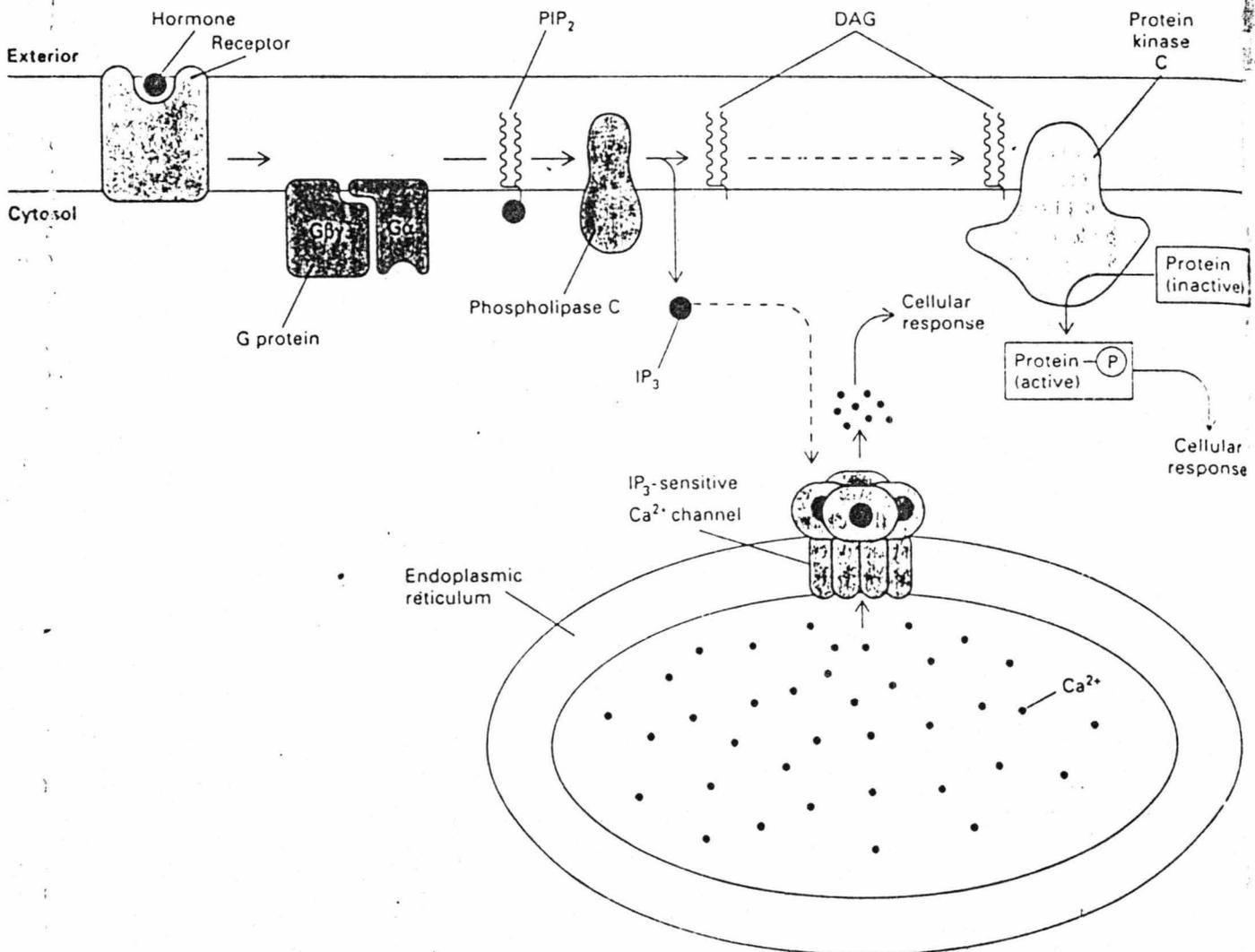
Otot tidak dapat berkontraksi tanpa rangsangan, karena satu molekul tropomiosin menutupi tujuh butiran aktin sedemikian rupa sehingga tidak terjadi sentuhan antara aktin dengan miosin. Posisi tropomiosin ini dipertahankan oleh adanya interaksi dengan kompleks troponin. Troponin terdiri dari tiga subunit salah satu subunit troponin mempunyai afinitas yang besar terhadap tropomiosin. Subunit troponin kedua bertindak sebagai inhibitor kontraksi dengan cara berikatan dengan aktin sehingga mendesak tropomiosin menempati posisi yang menghalangi sentuhan antara miosin dengan aktin. Subunit yang ketiga dapat mengikat ion Ca, pada pengikatan ini terjadi perubahan konformasi troponin sehingga menggeser posisi tropomiosin memasuki celah filamen tipis yang mengakibatkan terjadinya ikatan antara aktin dan miosin (Vander, 1990; Guyton, 1996).

d. Inositol 1,4,5-triphosphate (IP₃)

Pengikatan hormon reseptor di permukaan sel pada lever, lemak, dan sel-sel lain menginduksi elevasi sistolik ion Ca. Dalam situasi demikian ion Ca terlepas dari dalam sitosol dari endoplasmik retikulum dan vesikel intraseluler. Mekanisme dimana sinyal reseptor hormon pada permukaan sel

di transdusikan ke endoplasmik retikulum. Hidrolisa PIP_2 (*phosphatidylinositol 4.5-bisphosphate*) oleh enzim membran plasma phospholipase C (PLC) menghasilkan dua produk penting yaitu : 1,2-diacylglycerol (DAG) yang tetap dalam membran, dan inositol 1,4,5-triphosphate (IP_3) yang larut dalam air. Setelah terbentuk stimulasi hormon dari target sel, IP_3 berdifusi ke permukaan endoplasmik retikulum, dimana ia mengikat ke reseptor IP_3 spesifik, protein kanal ion Ca yang tersusun dari empat subunit yang identik, masing-masing mempunyai tempat pengikatan pada IP_3 . Pengikatan IP_3 menginduksi pembukaan kanal yang memungkinkan ion-ion Ca berdifusi dari endoplasmik retikulum dan mengikat ke reseptor IP_3 spesifik, protein kanal ion Ca yang tersusun dari empat subunit identik, masing-masing mempunyai tempat pengikatan IP_3 . Setiap subunit mengandung C-terminal yang merentangkan lipid-dua lapis (*lipid bilayer*) bersama-sama dengan transmembran dari empat monomer dari kanal ion Ca. N-terminal yang mengandung pengikatan IP_3 , dimana pengikatan IP_3 menginduksi pembukaan kanal yang memungkinkan ion-ion Ca keluar dari endoplasmik retikulum dan masuk ke dalam sitosol. Seluruh rangkaian peristiwa dari pengikatan hormon-hormon ke reseptor yang terkait dengan protein G hingga pelepasan ion Ca dapat dilihat

pada gambar 2.7. Di dalam pembentukan keduanya kebanyakan IP_3 dihidrolisa oleh inositol 1,4-bisphosphate adalah sebuah molekul yang tidak dapat menginduksi pelepasan ion-ion Ca dari endoplasmik retikulum, akibatnya pelepasan ion-ion Ca berakhir dengan cepat kecuali bila lebih banyak IP_3 dihasilkan oleh kerja phospholipase C (Alberts, 1989; Vander, 1990; Guyton, 1996).



Gambar 2.7 Pelepasan ion Ca dari endoplasmik retikulum (Harvey, 1986)

2.2.2 Energi kontraksi otot

Aspek yang penting dalam metabolisme di sel-sel otot berhubungan dengan ATP (adenosine triphosphate). Jadi ATP adalah mutlak untuk proses terjadinya kontraksi otot. Hidrolisis ATP oleh miosin-ATPase menyebabkan konformasi miosin yang memiliki afinitas pengikatan yang sangat tinggi untuk aktin. Hal tersebut dapat terjadi karena hidrolisis ATP menjadi ADP yang akan menyebabkan pelepasan energi akibat lepasnya ikatan fosfat berenergi tinggi. Sebelum proses kontraksi dimulai, ATP terikat pada kepala miosin. Aktifitas ATPase yang diaktifkan oleh ion Ca akan memecahkan ATP menjadi ADP dan fosfat inorganik (Pi). ADP dan Pi tetap terikat pada kepala miosin. Bila troponin-tropomiosin kompleks dihambat oleh ion Ca akan terjadi proses *sliding* antara aktin dan miosin. Selanjutnya enersi diperlukan untuk mesintesis kembali ADP menjadi ATP dari enersi metabolisme fosfo kreatin, dimana ATP akan disimpan pada kepala miosin untuk dipergunakan pada kontraksi berikutnya (Vander, 1990; Guyton, 1996).

Konsentrasi ATP yang terdapat di dalam serabut otot kira-kira sebanyak 4 mM, cukup untuk mempertahankan kontraksi penuh untuk beberapa detik. Sumber energi lain yang digunakan untuk menyusun kembali kreatin fosfat dan ATP adalah energi yang dilepaskan dari bahan makanan, karbohidrat, lemak, dan protein. Sebagian kecil dari energi ini dilepaskan sewaktu terjadi pemecahan awal

dari glukosa dan glikogen di dalam sel yaitu proses glikolisis. Walaupun demikian kira-kira 95 persen energi dilepaskan pada waktu oksidasi akhir dari bahan makanan yang berlangsung hampir seluruhnya di dalam mitokondria. Kedua proses ini mempergunakan energi yang dilepaskan dari bahan makanan untuk membentuk ATP baru. Kepentingan adanya glikolisis adalah bahwa energi yang dilepas untuk membentuk ATP baru kira-kira 2,5 kali lebih cepat dilepaskan melalui mekanisme ini dari pada melalui mekanisme oksidasi. Tetapi mekanisme glikolitik juga dengan cepat menumpuk hasil akhir glikolitik di dalam sel otot, sehingga glikolisis biasanya hanya dapat mempertahankan kontraksi otot maksimal selama satu menit. Sebaliknya pelepasan energi melalui oksidasi sangat efisien dan juga dapat menggunakan substrat makanan yang lain seperti lemak dan protein sebagai tambahan pada glukosa dan glikogen, sehingga dapat meneruskan aktivitas otot untuk beberapa jam (Harvey, 1986; Vander, 1990; Guyton, 1996).

2.2.3 Sistem penyediaan energi

Olahraga merupakan aktivitas kerja yang membutuhkan energi dari ATP. Perubahan energi kimia menjadi energi mekanik terjadi pada serabut otot. Peningkatan kapasitas kerja otot identik dengan peningkatan metabolisme energi (Lamb, 1984; Fox, 1988).

a. Adenosine triphosphate (ATP)

Energi yang dihasilkan oleh proses oksidasi bahan makanan tidak dapat digunakan langsung untuk proses kontraksi otot serta proses-proses biologis lainnya. Energi ini terlebih dahulu membentuk senyawa kimia berenergi tinggi yaitu adenosine triphosphate (ATP). ATP terbentuk dari adenosine diphosphate (ADP) dan phosphate inorganik (Pi) melalui suatu proses fosforilasi yang dirangkaikan dengan proses oksidasi molekul penghasil energi. Selanjutnya ATP yang terbentuk diangkut ke setiap bagian sel yang membutuhkan energi, kemudian dihidrolisis menjadi ADP dan Pi dan melepaskan energi yang dibutuhkan oleh proses biologis tersebut, hal ini berlangsung terus-menerus sehingga terjadi daur ATP - ADP (Lamb, 1984; Fox, 1988).

Apabila terjadi pemecahan ATP menjadi ADP dan Pi maka sejumlah energi akan dilepaskan, energi inilah yang dipergunakan oleh otot untuk berkontraksi dan berbagai proses biologis lainnya. Menurut Armstrong (1979) dan Fox (1984), bila satu dari ikatan ini pecah, maka 7 - 12 kilocalori energi dilepaskan, dan akan terbentuk ADP + Pi.

b. Pembentukan ATP dari ADP dan Pi

Kompleks proton membran yang melibatkan dalam sintesa ATP dinamakan F_0F_1 kompleks. Kompleks ini membentuk partikel-partikel berbentuk tonjolan yang menyembul keluar dari membran. Sintesa ATP terkait dengan gerakan proton, enzim-enzim yang mengkatalisir reaksi pathway Emben-Mayerhol dan siklus asam sitrat semuanya bertempat pada sitosol. Enzim-enzim yang mengoksidasi NADH menjadi NAD^+ dan mentransfer elektron ke akseptor terakhir. Oksigen ditempatkan pada membran plasma. Gerakan elektron melalui sel; gerakan proton kembali ke dalam sel yang menurunkan konsentrasi gradien yang berhubungan dengan sintesa ATP. Protein membran yang terlibat dalam sintesa ATP memiliki struktur dan fungsi dari F_0F_1 kompleks mitokondria (Murray, 1990; Devlin, 1993; Guyton, 1996).

Arah gerakan proton sama dalam khloroplast, mitokondria, dan bakteri. Setiap membran seluler mempunyai permukaan sitoplasma membran. Disamping itu tilakoid membran terbentuk sebagai invaginasi khloroplast membran dalam, sehingga permukaan luar tilakoid membran adalah permukaan sitoplasma yang sama dengan permukaan dalam (stromal) dari membran dalam khloroplast. Karena segmen F_1 mengkatalisis ATP yang dibentuk pada permukaan membran sitoplasma, sementara proton mengalir melalui F_0F_1 kompleks di membran dari permukaan ekstrasitoplasma ke permukaan sitoplasma. Arah gradien proton yang dibentuk oleh pengangkutan elektron sedemikian rupa sehingga konsentrasi proton lebih besar pada permukaan ekstra sitoplasma daripada

permukaan sitoplasma. Selama pengangkutan elektron mitokondria proton dipompa keluar matriks ke dalam ruang intermembran. Dalam fotosintesa elektron dipompa dari stroma ke lumen tilakoid dari permukaan sitoplasma ke permukaan ekstrasitoplasma tilakoid membran (Murray, 1990; Devlin, 1992; Guyton, 1996).

Dalam mitokondria penggabungan antara oksidasi NADH dan $FADH_2$ oleh oksigen dan sintesa ATP dari ADP dan P_i terjadi melalui gradien proton elektrokimia di membran mitokondria. Penambahan oksigen dan senyawa-senyawa seperti NADH atau piruvat pada mitokondria yang diisolasi menyebabkan sintesa ATP. Namun produksi ATP sangat tergantung pada integritas membran mitokondria (Devlin, 1992; Guyton, 1996).

Salah satu protein yang dominan dalam membran mitokondria adalah multi subunit *coupling factor* adalah enzim yang mensintesa ATP. *Coupling factor* mempunyai dua komponen utama yaitu F_0 adalah membran kompleks integral yang tersusun dari tiga atau empat polipeptida yang berbeda dan sebuah proteolipida (protein dengan lipida terikat secara kovalen) yang bersama-sama dengan mitokondria. F_1 yang melekat pada F_0 adalah sebuah kompleks yang terdiri dari lima polipeptida. F_1 membentuk tombol yang menyembul keluar pada sisi matriks membran, dapat dilepaskan dari membran dengan agitasi mekanik dan bisa larut dalam air. Bila dipisahkan dari membran secara fisik, F_1 hanya mampu mengkatalisir hidrolisis ATP, itulah sebabnya ia sering disebut F_1 -ATPase. Tetapi fungsi naturalnya adalah dalam sintesa ATP. Partikel-partikel submitokondria dimana F_1 yang dihilangkan tidak

dapat mengkatalisir ATP, disamping itu F_1 dapat bersambung kembali dengan partikel-partikel tersebut, sehingga mereka menjadi aktif lagi dalam sintesa ATP, hal ini membuktikan peranan F_1 dalam sintesa ATP (Murray, 1990; Devlin, 1993; Guyton, 1996).

c. Metabolisme aerobik dan anaerobik

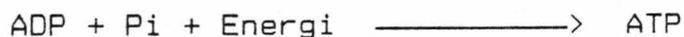
Salah satu alat tubuh yang menggunakan ATP sebagai sumber energi adalah otot. Energi digunakan untuk berkontraksi sehingga menimbulkan gerakan-gerakan sebagai aktifitas fisik. Menurut Fox dan Bower (1988), ATP paling banyak tertimbun dalam sel otot dibandingkan dengan jaringan tubuh lainnya. ATP yang tertimbun di dalam otot jumlahnya sangat terbatas sekitar 4 - 6 Mmol/kg otot, serta hanya untuk aktifitas berat dan cepat sekitar 3 - 8 detik. Oleh karena itu untuk aktifitas yang waktunya lebih lama perlu segera dibentuk ATP kembali.

Persediaan ATP dalam sel otot sangat terbatas, walaupun demikian suplai ATP harus secara berkesinambungan diganti untuk memudahkan aktivitas fisik secara berkelanjutan. Penyediaan ATP dapat diganti melalui tiga sistem energi, tergantung dari jenis kegiatan yang dilakukan. Ketiga sistem energi tersebut adalah *sistem ATP-PC*, *sistem asam laktat*, dan *sistem oksigen*. Sistem ATP-PC dan asam laktat, menghasilkan ATP tanpa oksigen dan disebut sistem anaerobik, sedangkan sistem oksigen menghasilkan ATP dengan menggunakan oksigen dan disebut sistem aerobik (Lamb, 1984; Fox, 1988).

d. Sistem adenosine triphosphate-phosphagen creatine (ATP-PC)

ATP yang disimpan di dalam sel otot sangat sedikit sekali jumlahnya, maka keadaan ini sangat sensitif untuk pengaturan metabolisme energi. Kehilangan energi terjadi sangat cepat sekali apabila seseorang memulai latihan fisik yang cukup berat. Untuk mempertahankan sejumlah konsentrasi ATP yang relatif kecil ini segera diganti dengan meningkatkan metabolisme energi di dalam sel otot. Yaitu dengan cara memecahkan creatine phosphate (CP) yang tersimpan di dalam sel otot menjadi phosphate dan creatine. Proses ini akan menghasilkan energi yang dipakai untuk mensintesa ADP dan Pi menjadi ATP, dan selanjutnya akan dirobah lagi menjadi ADP + Pi yang menyebabkan terjadinya pelepasan energi yang dibutuhkan untuk kontraksi otot. Perubahan CP ke C + P tidak menghasilkan tenaga yang dapat dipakai langsung untuk kontraksi otot, melainkan dipakai untuk mensintesa ADP+Pi menjadi ATP (Lamb, 1984; Fox, 1988).

Jumlah PC yang tersimpan dalam sel otot sangat sedikit sekali, maka energi yang dapat diberikan hanya berlangsung kira-kira 8 sampai 10 detik saja. Sistem ini merupakan sumber energi yang paling utama untuk aktivitas kerja yang sangat cepat dan eksplosive (daya ledak) misalnya lari 100 meter, angkat besi, lompat tinggi, nomor-nomor lempar dan lain-lain olahraga yang membutuhkan kecepatan dan daya ledak. Energi dan fosfat digunakan untuk membentuk kembali ATP dari ADP sebagai berikut :



Seluruh reaksi dalam metabolisme yang terjadi di dalam tubuh memerlukan enzim, termasuk dalam pemecahan ATP (Lamb, 1984; Fox, 1988).

Fox (1988) berpendapat bahwa sistem fosfagen ini sangat bermanfaat untuk gerakan-gerakan seperti daya ledak (*explosive power*), kecepatan (*sprint*), karena sistem ini tidak melalui rangkaian reaksi kimia yang panjang, dan tidak membutuhkan oksigen, serta ATP-PC tersimpan didalam mekanisme kontraksi otot.

Tabel 2.1 Perkiraan Penyediaan Energi Dalam ATP-PC

	ATP	PC	Jumlah fosfagen keseluruhan (ATP-PC)
1. Konsentrasi dalam otot			
a.mM/kg otot	4 - 6	15 - 17	19 - 23
b.mM massa otot total	120-180	450-510	570 - 690
2. Energi yang bermanfaat			
a.kcal/kg otot	0,04-0,06	0,15-0,17	0,19-0,23
b.kcal massa otot total	1,2-1,8	4,5-5,1	5,7-6,9

(Fox, 1988)

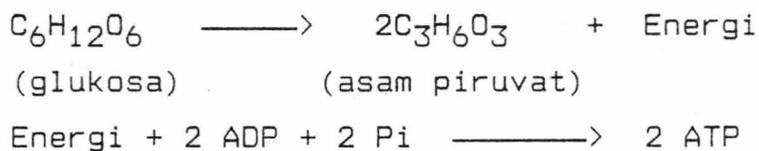
e. Sistem glikolisis anaerobik (asam laktat)

Sistem anaerobik selain resintesa ATP di dalam otot, juga glikolisis anaerobik melibatkan pemecahan dari salah satu bahan makanan yaitu karbohidrat (glukosa) menjadi asam laktat. Di dalam tubuh semua karbohidrat dikonversi menjadi glukosa yang disimpan dalam hati dan otot sebagai glikogen untuk cadangan enersi (Lamb, 1984; Fox, 1988). Kerja secara anaerobik melibatkan suatu proses yang disebut glikolisis dengan hasil akhir dari glikogen yang dibakar adalah asam laktat. Dengan konsentrasi kadar asam laktat yang tinggi dalam otot akan menyebabkan reaksi kontraksi dari otot akan menjadi lamban. Apabila konsentrasi asam laktat terlalu tinggi akan menyebabkan otot tidak sanggup lagi berkontraksi. Saltin (1981) mengatakan bahwa apabila terjadi menumpukan asam laktat akan menurunkan kemampuan kerja dari otot. Selanjutnya pendapat ini ditunjang oleh pendapat Janssen (1987) yang mengatakan bahwa dengan meningkatnya kadar asam laktat yang tinggi dapat menimbulkan terjadinya asidosis pada sel otot, koordinasi terganggu, meningkatnya resiko cedera, sistem fosfo-kreatin dan oksidasi asam lemak terganggu.

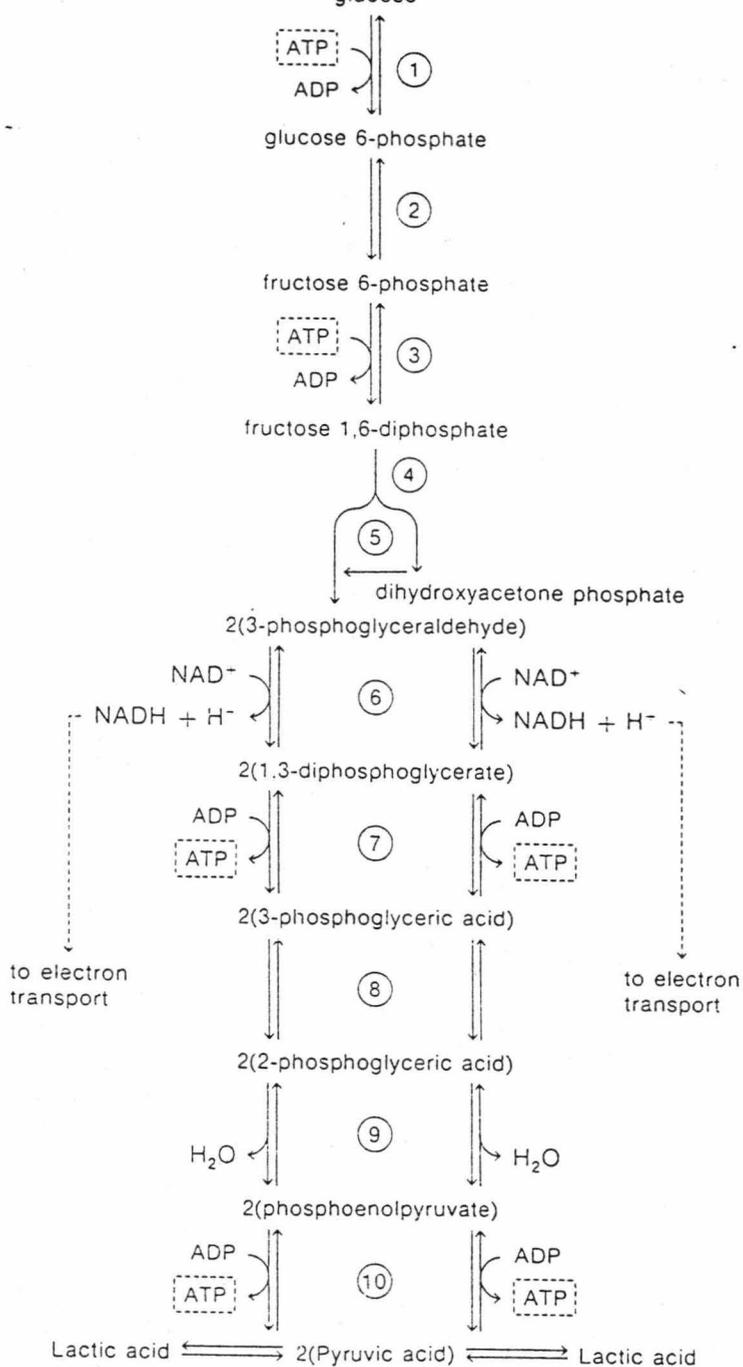
Asam laktat adalah hasil dari proses glikolisis anaerobik. Proses ini memerlukan 12 macam reaksi yang berurutan (Brooks, 1984; McArdle, 1986). Oleh karena itu pembentukan energi liwat sistem asam laktat berjalan lebih lambat dan lebih rumit bila dibandingkan dengan ATP-PC. Sebuah molekul glukosa yang masuk ke dalam sel dan digunakan untuk menyediakan energi, maka glukosa mengalami serangkaian reaksi

kimia yang disebut glikolisis yang terjadi di dalam sel di luar mitokondria. Pada reaksi pertama ATP bertindak sebagai donor fosfat agar glukosa menjadi *glukose-6-fosfat*. Reaksi kedua berubah lebih lanjut menjadi *fruktose-6-foafat*, dan fosforilasi terjadi lagi pada reaksi ketiga sehingga menghasilkan *fruktose-1,6-difosfat*. Setelah meliwati reaksi rangkaian kelima, terurai menjadi 2 molekul *3-fosfogliseraldehid*. Rangkaian berikutnya terbentuk 2 molekul *asam piruvat*. Dalam keadaan tanpa oksigen, asam piruvat tidak masuk kedalam mitokondria, justru berubah menjadi asam laktat (gambar 2.8)

Satu molekul glukosa dapat menyediakan energi yang cukup untuk meresintesa 3 ATP. Reaksi sebagai berikut :



Skema glikolisis anaerobik seperti pada gambar 2.8 di bawah ini. Asam laktat yang terbentuk dalam glikolisis anaerobik akan menurunkan pH, dan meningkatkan keasaman dalam otot maupun dalam darah. Perubahan pH akan menghambat kerja enzim-enzim atau reaksi kimia dalam sel, terutama dalam sel otot, sehingga menyebabkan kontraksi otot bertambah lemah dan pada akhirnya mengalami kelelahan. (McArdle, 1981; Fox, 1988).



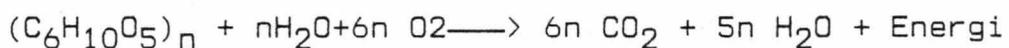
Gambar 2.8. Glikolisis anaerobik (McArdle, 1981)

f. Energi aerobik

Sebagian besar otot manusia menghasilkan laktat bila bekerja berat, walaupun peredaran darah tidak terganggu dan penggunaan oksigen sangat besar.

Hal ini berlangsung tergantung pada keadaan enzim dan tenaga yang dihasilkan. Serat otot merah yang mengandung banyak mitokondria membentuk sedikit sekali laktat, sedang serat otot putih yang mengandung sedikit mitokondria akan membentuk banyak laktat. Otot mempunyai nilai ambang anaerobik, yaitu batas beban kerja yang bila dilampaui akan mengakibatkan peningkatan kadar laktat yang tajam. Yang dimaksud dengan pengertian anaerobik di sini adalah peningkatan katabolisme glukosa yang tidak seimbang dengan peningkatan penggunaan oksigen yang memang sudah tinggi. Kadar laktat darah meningkat sampai 4 mM pada batas amuangnya. Otot yang besar pada umumnya mencapai batas ini bila penggunaan oksigen adalah 0,6 dari maksimum yang dapat dicapai mitokondria

Bila oksigen mencukupi maka 1 mol glikogen akan terurai secara sempurna menjadi CO_2 dan H_2O , sambil melepaskan energi untuk resintesa 39 ATP (Amstrong, 1979; Mayes, 1987; Fox, 1988).



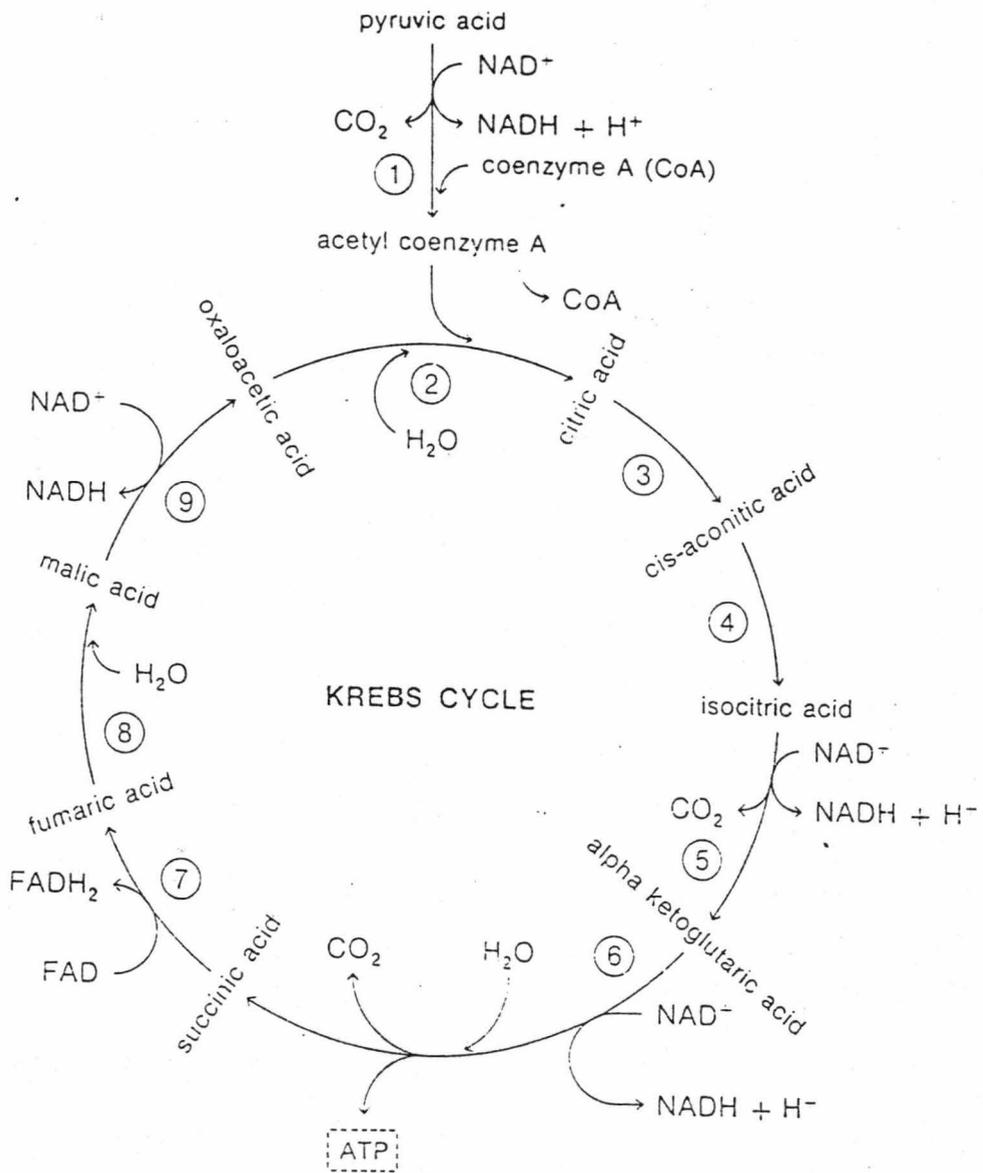
Sistem glikolisis aerobik dapat dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu glikolis, siklus Krebs dan transport elektron.

g. Glikolisis aerobik

Pada tahap ini rangkaian reaksinya sama dengan proses glikolisis anaerobik, dimana glikogen atau glukosa mengalami serangkaian reaksi kimia menjadi asam piruvat. Kalau pada glikolisis anaerobik asam piruvat tidak masuk ke dalam mitokondria, asam piruvat membentuk asam laktat di dalam sitoplasma, tetapi bila oksigen mencukupi sebagian besar asam piruvat masuk ke dalam mitokondria melalui enzim dan mengalami serangkaian reaksi kimia. Hasil akhir glikolisis ini dengan cukupnya oksigen diarahkan ke jalur aerobik. Mayes (1987), asam laktat yang terbentuk pada glikolisis anaerobik sebenarnya merupakan sumber energi kimia yang tersimpan. Setelah oksigen mencukupi hidrogen yang terikat pada asam laktat diambil oleh NAD dan dimasukkan ke sistem transport elektron. Pada tahap glikolisis ini selain terbentuk energi (ATP) juga terjadi dua perubahan kimia yang penting, yaitu terbentuknya CO_2 dan terjadinya oksidasi yang membebaskan elektron. Setelah CO_2 terlepas asam piruvat sebagai hasil akhir dari glikolisis anaerobik, masuk ke dalam mitokondria untuk bersenyawa dengan Koenzim A (Ko-A), sehingga terbentuk senyawa asetil Ko-A. Selanjutnya Ko-A bersenyawa dengan asam oksalat membentuk asam sitrat yang kemudian asam sitrat masuk ke dalam daur Krebs (*Krebs-cycle*).

h. Daur Krebs (Krebs-cycle)

Daur Krebs disebut juga sebagai daur asam trikarboksilat atau daur asam sitrat. Pada daur ini terjadi dua perubahan kimia, ialah terbentuknya CO_2 dan energi serta terjadinya oksidasi, dalam hal ini terbebaskannya elektron-elektron. Fungsi utama daur Krebs adalah menghasilkan elektron yang selanjutnya diikat oleh NAD dan FAD. Pada metabolisme karbohidrat (glikolisis aerobik), setiap satuan asetil yang turut serta dalam Daur Krebs akan menghasilkan ikatan dehidrogenasi dengan tiga NAD dan satu FAD, serta terbentuk pula *guanosin triphosphate* (GTP) yang mengandung sejumlah energi yang sepadan dengan ATP (Astrand, 1986). Sedangkan koenzim NADH_2 dan FADH_2 yang terjadi pada berbagai langkah hidrogenasi akan masuk ke rantai pernapasan atau sistem transport elektron. Adapun karbondiosida (CO_2) yang terbentuk akan berdifusi ke dalam darah dan dibawa ke paru untuk selanjutnya dikeluarkan dari tubuh. Untuk lebih jelasnya proses pembentukan ATP lewat jalur daur Krebs dapat dilihat pada gambar 2.9.

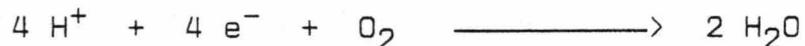


Gambar 2.9 Pembentukan ATP melalui Daur Krebs (McArdle, 1981)

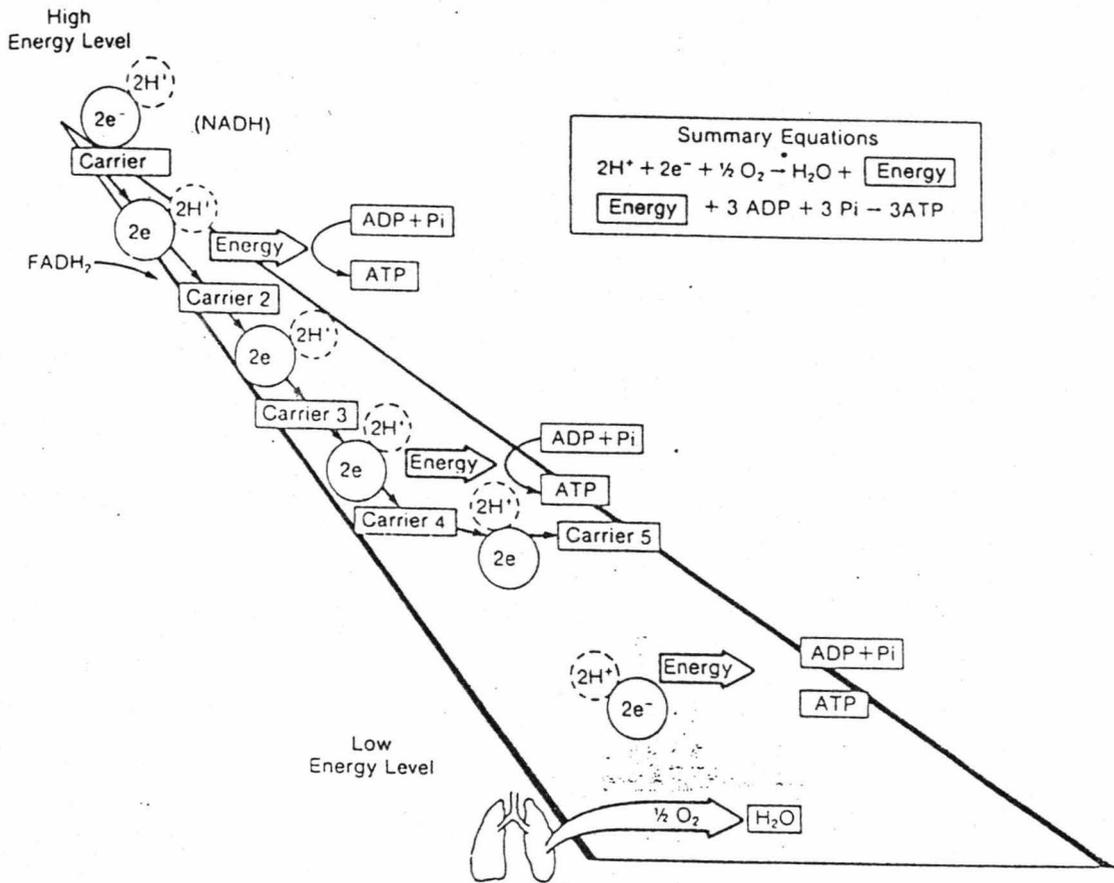
i. Sistem transport elektron

Sistem transport elektron disebut juga sebagai rantai angkut elektron atau rantai pernapasan. Sistem ini sangat rumit, terdiri dari lipoprotein dengan berbagai macam sitokrom dan pembantu lainnya. Rangkaian reaksi yang terjadi dikenal dengan fosforilasi oksidatif (Mayes, 1987; McArdle, 1986). Pengaliran dua elektron melalui sistem transport elektron akan membebaskan energi untuk fosforilasi ADP menjadi ATP pada tiga tempat yang berbeda, dan pada akhir mata rantai sistem ini setiap pasang elektron akan bergabung dengan dua buah proton (H^+) dan oksigen membentuk molekul air (H_2O). $NADH_2$ masuk ke tempat pertama dan menghasilkan NAD dan 3 molekul ATP, sedangkan $FADH_2$ akan masuk ke tempat ke dua dan menghasilkan FAD dan 2 molekul ATP. Koenzim yang baru saja terbebas dapat kembali berperan serta pada proses dehidrogenase.

Pada metabolisme karbohidrat, kelanjutan pemecahan glikogen pada tahap ini terbentuk H_2O yang dihasilkan dari senyawa H^+ yang terjadi dalam daur krebs serta O_2 yang dihirup. Reaksi yang terjadi sebagai berikut :



Sewaktu terjadi transport elektron di dalam rantai pernapasan (*respiratory chain*) sejumlah energi dilepaskan.



Gambar 2.10 Sistem transport elektron (Fox, 1988)

Dengan demikian dari sistem tersebut dapat dirinci sebagai berikut 3 ATP sebagai hasil glikolisis dalam sitoplasma, dan 36 ATP sebagai hasil oksidasi aerobik dalam mitokondria. Hasil akhir sistem aerobik

secara keseluruhan sebanyak 39 ATP bila bahannya adalah glikogen.

Perbandingan ketiga sistem dalam pembentukan ATP adalah sebagai berikut :

Tabel 2.2 Pembentukan ATP pada sistem energi

Sistem	Bahan baku	Kebutuhan O ₂	Kecepatan
Anaerobik:			
ATP-PC	Phosphocreatine	Tidak	Tercepat
Lactid Acid	Glycogen	Tidak	Cepat
Aerobik	Glycogen, lemak, protein	Ya	Lambat

(Fox, 1988)

Tabel 2.3 Kapasitas maksimal dan power pada sistem energi

Sistem	Maximal power (mole ATP/menit)	Maximal capacity (ATP yang tersedia)
ATP-PC	3,6	0,7
Lactid Acid	1,6	1,2
Aerobik	1,0	

(Fox, 1988)

Pada umumnya aktivitas olahraga tidak hanya menggunakan energi aerobik saja atau anaerobik secara murni. Tetapi pada kenyataannya adalah gabungan dari

sistem energi tersebut. Proporsi kebutuhan dari kedua sistem energi untuk tiap aktivitas atau kegiatan pada olahraga adalah berbeda, biasanya terjadi campuran. Olahraga yang membutuhkan kecepatan tinggi atau intensitas tinggi sistem energi dominan yang dibutuhkan adalah sistem anaerobik, sedangkan pada olahraga yang membutuhkan daya tahan (*endurance*) atau aktivitas olahraga yang berlangsung lama, sistem energi yang dibutuhkan adalah sistem aerobik. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 2.4

Tabel 2.4 Sistem energi dominan berbagai aktivitas olahraga.

Olahraga	% kebutuhan persistem energi		
	ATP-PC dan LA	LA-O2	O2
Baseball	80	20	-
Basketball	85	15	-
Fencing	90	10	-
Field hockey	60	20	20
Football	90	10	-
Golf	95	5	-
Gymnastics	90	10	-
Ice hockey :			
Forward, defense	80	20	-
Goalie	90	10	-
Lacrosse :			
Goalie, defense, attack men	80	20	-
Midfielders, man-down	60	20	20
Recreational sport	5	5	90
Rowing	20	30	50
Skiing :			
Slalom, jumping, down-hill	80	20	-
Cross-country	-	5	95
Soccer :			
Goalie, wings, strikers	80	20	-
Halfbacks, link men	60	20	20
Softball	80	20	-

Lanjutan Tabel 2.4

Olahraga	% kebutuhan persistem energi		
	ATP-PC dan LA	LA-O2	O2
Swimming and diving :			
50 m freestyle, diving	98	2	-
100 m, 100 yd (all strokes)	80	15	5
200 m, 220 yd (all strokes)	30	65	5
400 m, 440 yd, 500 yd	20	55	25
Freestyle :			
1500 m, 1650 yd	10	20	70
Tennis	70	20	10
TRack and field :			
100 m, 100 yd, 200 m, 220 yd	95	5	-
Field even	98	2	-
400 m, 440 yd	80	15	5
800 m, 880 yd	30	65	5
1500 m, 1 mile	15	55	30
2 mile	15	20	65
3 mile, 5000 m.	10	20	70
6 mile (cross-country),			
10.000 m.	5	15	80
Marathon	-	2	98
Volleyball	85	10	5
Wrestling	90	10	-

(Fox, 1988).

2.3 Latihan Fisik

Latihan fisik pada dasarnya merupakan suatu program latihan fisik diambil dari istilah *physical training*. Beberapa tujuan *physical training* adalah untuk rekreasi, *physical fitness* dan prestasi (Nieman, 1986, Glassford, 1990, Bouchard, 1993). *Physical training* dituangkan dalam bentuk program latihan fisik (Glassford, 1990; Bouchard, 1993; Nieman, 1993).

2.3.1 Prinsip pembebanan latihan fisik

Jenis latihan fisik atau cabang olahraga yang dipilih harus menyenangkan, cocok untuk kondisi tubuhnya (Seaton, 1974). Jenis latihan fisik yang akan dilakukan

terdapat empat tahap. Tahapan dalam setiap latihan fisik terdiri atas aktivitas; peregangan, pemanasan, pelaksanaan latihan dan pendinginan. Adapun prinsip-prinsip program latihan fisik adalah sebagai berikut:

a. Beban bertambah (*overload*)

Kemampuan fisik tiap individu tidak sama, maka kondisi awal latihanpun tidak boleh diberikan beban sama. Untuk mencapai kondisi fisik tertentu dilaksanakan dengan pemberian beban bertambah secara bertahap yang tidak melebihi beban latihan maksimal. Jadi dosis (beban terukur) latihan fisik yang diberikan perlu diperhatikan besar intensitas kerja tubuh, frekuensi dan lama latihan (Brooks, 1987; Dirix, 1988; IOC, 1990).

b. Menghindari dosis berlebih (*overtraining*)

Pemberian dosis latihan fisik yang melebihi kemampuan maksimal tubuh dapat mengakibatkan cedera pada organ tubuh maupun pada tingkat seluler (Dirix, 1988; IOC, 1990). Sehingga latihan fisik yang diberikan bukannya meningkatkan kemampuan tubuh, tetapi justru menyebabkan tubuh menjadi sakit (Pyke, 1991; Rushall, 1992).

c. Pulih asal (*recovery*)

Setiap latihan fisik yang membutuhkan enersi melebihi kebutuhan basal akan memerlukan waktu

pulih asal. Apalagi otot skelet yang telah diberi beban kontraksi, juga membutuhkan waktu pulih asal. Latihan fisik berat akan membutuhkan waktu pulih asal kira-kira 46 jam. Sebab otot dan sistem tubuh lainnya tidak sama dengan mesin, dimana mesin yang kehabisan bahan bakar dapat dipacu kembali setelah diberi tambahan bahan bakar (Dirix, 1988; IOC, 1990).

d. Khusus (*specific*)

Jenis latihan dan dosis latihan yang diberikan harus sesuai dengan kondisi tubuh dan jenis olahraga yang ditekuni. Misalnya; jenis olahraga ketahanan (*endurance*) harus diberikan dosis latihan yang bertujuan utama untuk meningkatkan kemampuan aerobik (Dirix, 1988; IOC, 1990).

e. Mempertahankan dosis latihan fisik

Tambahan dosis latihan fisik tidak terus diberikan pada setiap kali latihan. Mempertahankan dosis latihan fisik dapat ditujukan pada metoda meningkatkan kemampuan fisik untuk tujuan prestasi maupun dalam upaya untuk mempertahankan kondisi tubuh (Dirix, 1988; IOC, 1990).

f. Periodisasi latihan

Pada *physical training* untuk prestasi harus dilakukan secara periodik menurut kebutuhan pertandingan atau perlombaan (IOC, 1990). Periodisasi latihan fisik juga harus memperhatikan bobot persiapan fisik, teknik dan taktik

serta psikis (Bompa, 1990). Sedangkan untuk tujuan *physical fitness*, maka latihan fisik harus dilakukan dengan teratur (Seaton, 1974).

g. Individual

Setiap jenis aktivitas fisik yang dilakukan harus dipertimbangkan sesuai dengan kondisi dan kemampuan tubuh baik pada tingkat organ maupun tingkat seluler. Selain itu, faktor kesenangan tidak boleh diabaikan (Seaton, 1974; Bompa, 1990; IOC, 1990).

2.3.2 Dosis latihan fisik

Pembuatan program latihan fisik bukanlah suatu pekerjaan yang mudah, sebab tidak semua jenis latihan fisik dapat menimbulkan "stimulator" fungsi organ tubuh (Pyke, 1991). Besar beban latihan fisik perlu dikaji, sehingga beban latihan fisik tidak menimbulkan *micro injury* atau *stressor* organ tubuh.

Beban latihan fisik harus terukur (Bouchard, 1993). Ukuran beban latihan fisik tersebut akan dinamakan dengan "dosis latihan fisik". Maka dosis adalah beban latihan fisik yang terukur yang mengandung unsur; intensitas, frekuensi, waktu dan jenis latihan (Neufeldt, 1991; Bouchard, 1993; Fox, 1993; Weidner, 1994).

a. Intensitas

Intensitas dapat diartikan sebagai tingkatan kualitas (berat, sedang dan ringan).

b. Frekuensi

Frekuensi merupakan jumlah kejadian.

c. Waktu

Waktu adalah waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan latihan.

d. Jenis

Yang dimaksud jenis adalah karakteristik latihan dari intensitas, frekuensi dan waktu.

2.3.3 Latihan squat

Latihan squat adalah jenis latihan yang menggunakan beban untuk meningkatkan atau mengembangkan kekuatan, dan daya ledak pada otot tungkai. Latihan squat dilakukan dengan memberi beban barbel pada tubuh yang diletakkan pada pundak. Stone (1991) mengatakan bahwa untuk melakukan latihan squat *bar* atau palang besi diletakkan pada pundak, berdiri dengan posisi kedua kaki kangkang selebar dengan bahu, selanjutnya lutut dibengkokkan kemudian lurus kembali keatas dengan posisi badan tetap lurus.

Untuk mendapatkan pengaruh dari latihan squat harus memperhatikan intensitas, jumlah set, frekuensi dan durasi latihan. Ada beberapa jenis latihan squat yaitu; *quarter squat*, *half squat*, dan *full squat*, yang pada prinsipnya semuanya adalah untuk meningkatkan kemampuan pada otot tungkai sedangkan perbedaannya hanyalah pada sudut yang dibentuk oleh lutut pada waktu pelaksanaannya (McCullagh, 1997).

2.3.4 Latihan half squat irama lambat

Latihan half squat irama lambat adalah suatu bentuk latihan beban yang berlangsung lama dengan inten-

sitas yang rendah. Selama latihan tubuh mampu mencukupi kebutuhan oksigen, kecuali pada awal latihan. Jadi sistem yang berperan untuk menyediakan energi dalam merisintesa ATP adalah sistem aerobik. Bahan bakar yang utama adalah karbohidrat dan lemak. Pada awal latihan akan menggunakan sistem anaerobik, setelah itu sistem aerobik yang akan berperan (Stone, 1991).

Menurut Fox (1988), latihan atau aktifitas ini termasuk dalam daerah 4 yang memerlukan waktu penampilan lebih dari 3 menit.

2.3.5 Latihan half squat irama cepat

Latihan half squat irama cepat adalah bentuk latihan beban yang berlangsung singkat, cepat dengan intensitas yang tinggi, dan biasanya berlangsung kurang dari 3 menit. Pada latihan ini tubuh belum mampu memenuhi kebutuhan oksigen, maka sistem energi untuk meresintesa ATP berlangsung secara anaerobik. Jadi energi yang disediakan berasal dari fosfagen dan glikolisis anaerobik dengan bahan bakar utamanya adalah karbohidrat.

Menurut Fox (1988) dan Bowers (1992), latihan ini termasuk dalam daerah 1, yaitu aktifitas dengan intensitas tinggi dan memerlukan waktu penampilan kurang dari 30 detik. Janssen (1989), lebih merinci bahwa aktifitas dengan maksimal yang berlangsung anaerobik tanpa laktat dan murni dari persediaan ATP otot. Bila berlangsung 4-2 detik sistem energinya adalah anaerobik tanpa laktat yang berasal dari sistem ATP-PC, sedangkan berlangsung 20-45 detik sistem energinya adalah ATP-PC ditambah sistem glikolisis anaerobik.

2.3.6 Kegunaan latihan squat

Tujuan latihan squat yaitu untuk mengembangkan atau meningkatkan kekuatan, daya ledak, daya tahan, dan hipertrofi pada otot tungkai misalnya *otot quadriceps femoris, gluteus, hamstring, gastrocnemius* dan lain-lain (Soekarman, 1987). Latihan squat pada dasarnya mempunyai pengaruh atau efek untuk meningkatkan kemampuan fisik secara umum. Akibat dari latihan squat dengan beban barbel akan meningkatkan kekuatan maupun hipertrofi pada otot tungkai yang pada gilirannya akan mempengaruhi peningkatan kecepatan daya ledak otot.

2.4 Daya Ledak

Daya ledak adalah gerakan yang menggunakan kekuatan dan kecepatan dengan bersamaan yang lazim disebut dengan *explosive power*. Daya ledak adalah komponen gerakan yang sangat dibutuhkan dalam berbagai cabang olahraga yang membutuhkan kontraksi otot yang cepat dan kuat, untuk meningkatkan prestasi olahraga. Menurut Pyke (1980), bahwa otot yang kuat mempunyai daya ledak yang besar, sebaliknya daya ledak otot yang besar mempunyai pula kekuatan yang besar.

Daya ledak sangat dibutuhkan dalam berbagai olahraga terutama dalam efisiensi gerakan. Daya ledak dapat ditingkatkan dengan melatih kekuatan atau kecepatan, atau sekaligus melatih kedua-duanya secara bersamaan atau simultan. Annarino (1976), mengemukakan bahwa daya ledak berkaitan dengan kekuatan dan kecepatan kontraksi otot yang dinamis dan eksplosif, yang mengerahkan kekuatan otot secara maksimum dalam waktu yang singkat dan cepat. Boosey (1980) berpendapat bahwa perpaduan gerakan

antara kekuatan dan kecepatan akan menghasilkan suatu gerakan yang disebut daya ledak. Kemudian Harre (1982), berpendapat bahwa daya ledak yaitu suatu kemampuan seseorang untuk mengatasi tahanan dengan kecepatan tinggi dalam gerakan yang sempurna. Selanjutnya Bosco (1983), menyatakan daya ledak adalah suatu kemampuan seseorang untuk melakukan suatu gerakan yang cepat dengan kekuatan yang maksimal.

Jensen (1983), berpendapat bahwa daya ledak adalah merupakan suatu komponen yang sangat dibutuhkan dalam melakukan kegiatan yang berat seperti melempar, melompat, memukul dan lain-lain. Menurut Fox (1993), daya ledak adalah kemampuan untuk menampilkan kerja maksimal per unit waktu, Sedangkan Bompa (1990) berpendapat bahwa daya ledak adalah merupakan suatu hasil dari kekuatan dan kecepatan yang maksimal.

Berdasarkan dari pendapat diatas tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa daya ledak itu ditentukan atau dipengaruhi oleh dua komponen yaitu kekuatan dan kecepatan. Jadi untuk meningkatkan daya ledak yang maksimal maka harus melatih kedua komponen tersebut sebaiknya secara bersamaan.

2.4.1 Jenis-jenis daya ledak

Hampir semua cabang olah raga dalam pelaksanaannya membutuhkan daya ledak disamping membutuhkan kemampuan fisik yang lain. Dalam melakukan aktivitas olahraga tidak sama gerakan yang dilakukan sehingga kebutuhan akan daya ledak berbeda pula. Misalnya daya ledak pada olahraga bola voli tidak sama dengan kebutuhan daya ledak pada atletik. Berdasarkan dengan ini maka ada

beberapa pembagian dari jenis daya ledak. Menurut **Nosseck (1982)** membagi daya ledak menurut aktivitas gerakan yaitu:

a. Kekuatan daya ledak

Kekuatan disini digunakan untuk mengatasi resistensi yang lebih rendah, tetapi dengan kecepatan daya ledak yang maksimal. Daya ledak seperti ini biasanya digunakan dalam permainan bola basket untuk gerakan berlari sambil melompat, sedangkan pada permainan bola voli pada saat melakukan smash dan menahan smash.

b. Kekuatan gerak cepat

Gerakan ini dilakukan pada resistensi dengan percepatan dibawah maksimal. Ini digunakan pada saat melakukan gerakan yang berulang-ulang misalnya berlari.

Berger (1982) membagi daya ledak menurut jenis beban yang digunakan yaitu daya ledak absolut dan daya ledak relatif. Daya ledak absolut artinya kekuatan yang digunakan untuk mengatasi beban dari luar (eksternal) yang maksimal, sedangkan daya ledak relatif yaitu kekuatan yang digunakan dalam mengatasi beban dari badan sendiri (internal). Selanjutnya pembagian daya ledak menurut **Bompa (1990)** sesuai dengan gerakan dari berbagai cabang olahraga sebagai berikut:

a. Daya ledak asiklik (*acyclic power*)

Daya ledak yang digunakan pada olahraga yang gerakannya kombinasi atau kompleks seperti pada olahraga atletik, senam, bola voli dan lain-lain.

Daya ledak asiklik gerakan utamanya adalah gerakan maju dengan kekuatan yang maksimal tetapi di dalam latihan menggunakan beban lebih ringan dengan pelaksanaan yang sangat cepat.

b. Daya ledak siklik (*cyclic power*)

Daya ledak ini digunakan pada olahraga yang gerakannya sama serta terulang, misalnya lari cepat (*sprint*), renang, balap sepeda, serta olahraga yang membutuhkan kecepatan .

2.4.2 Faktor yang mempengaruhi daya ledak

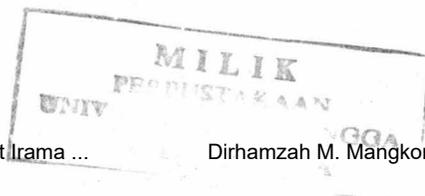
Ada beberapa hal yang berpengaruh dalam daya ledak. Menurut Kirkendall (1980), bahwa daya ledak adalah hasil dari komponen kekuatan dan kecepatan dengan rumus: $P = F \times V$, yaitu P (daya ledak) adalah hasil perkalian dari F (kekuatan) dengan kecepatan (V). Hal ini seirama dengan apa yang telah dikemukakan oleh Annarino (1976), bahwa dengan meningkatkan kekuatan dan kecepatan diharapkan akan meningkatkan pula daya ledak.

Lebih jauh Jensen (1983) mengemukakan, daya ledak dipengaruhi oleh kekuatan dan kecepatan baik itu merupakan kecepatan rangsangan saraf maupun kekuatan kontraksi otot. Jadi untuk meningkatkan daya ledak ada berbagai cara yang dapat dilakukan yaitu dengan latihan untuk meningkatkan kekuatan dengan memperhatikan kecepatan, atau sebaliknya latihan untuk meningkatkan kecepatan dengan memperhatikan kekuatan atau sekaligus keduanya dilatih bersamaan (simultan).

Sage (1984) berpendapat bahwa daya ledak yaitu dipengaruhi oleh kecepatan sitem saraf dalam memberikan rangsangan. Golding (1968) dan Fox (1981) lebih jauh mengemukakan bahwa daya ledak itu dipengaruhi oleh dua komponen yaitu kekuatan dan kecepatan, baik itu kecepatan rangsang saraf maupun kecepatan kontraksi otot. Jadi untuk meningkatkan daya ledak, sebaiknya:

- a. Meningkatkan kekuatan dengan tidak mengabaikan kecepatan. Adapun beban latihan yang diberikan yaitu: submaksimal, durasi 7 sampai 10 detik, ulangan 8 sampai 10 kali dan jumlah serinya 3 sampai 4 set (O'Shea, 1976).
- b. Meningkatkan kecepatan dengan tidak mengabaikan kekuatan. Intensitas beban latihan ringan sampai sedang. Berat beban kira-kira 60% sampai 90% dari kekuatan maksimum dan kontraksi otot dipersingkat (Jensen, 1983).
- c. Meningkatkan kekuatan dan kecepatan secara simultan. Berat beban berkisar antara 30% sampai 60% dari kekuatan maksimum dengan kecepatan kontraksi maksimum, hal ini akan meningkatkan kekuatan, kecepatan, serta daya ledak (Sharkey, 1984).

Pyke (1980) mengemukakan bahwa untuk meningkatkan daya ledak maka dalam menggunakan beban, sebaiknya beban tidak terlalu berat sehingga tubuh masih mampu bergerak dengan cepat dengan jumlah ulangan yang lebih banyak. Selanjutnya Nossek (1982) menganjurkan apabila latihan beban itu bertujuan untuk meningkatkan daya ledak maka sebaiknya :



Beban latihan : 70% - 80% dari kekuatan maksimal.
Jumlah Seri (set) : 3 - 5 kali.
Ulangan per seri : 10 kali.
Interval per seri : 2 - 4 menit.

Sedangkan Harre (1982) mengemukakan program latihan beban untuk meningkatkan daya ledak sebagai berikut:

Beban latihan : 30% - 50% dari kekuatan maksimal.
Jumlah Seri (set) : 4 - 6 kali.
Ulangan per seri : 6 - 10 kali.
Interval per seri : 2 - 5 menit.

2.5 Kekuatan Otot

Salah satu faktor yang sangat penting dan mutlak untuk meningkatkan prestasi dalam olahraga ialah faktor kekuatan otot (*muscle strength*), jadi dalam latihan fisik yang utama adalah faktor kekuatan. Kekuatan otot adalah kemampuan otot atau sekelompok otot yang berkontraksi secara maksimal. Menurut pendapat Stull (1980) bahwa kekuatan otot adalah jumlah tegangan maksimal yang ditimbulkan oleh suatu kontraksi tunggal. Selanjutnya Fox (1988) memberi definisi bahwa kekuatan otot adalah sebagai gaya (*force*) yang dapat melawan tahanan dengan suatu usaha yang maksimal. Clarke (1980), kekuatan adalah penentu utama dalam pencapaian prestasi pada olahraga, serta komponen lain adalah penunjang yang terbentuk bersamaan dalam proses peningkatan kekuatan. Sedangkan Costill (1979) berpendapat bahwa kekuatan itu adalah kemampuan maksimal untuk melawan gaya.

Rash (1957) dalam penelitiannya mengatakan bahwa dengan latihan beban akan meningkatkan kekuatan, daya tahan serta hipertrofi otot. Selanjutnya Roy (1983), berpendapat bahwa latihan beban yang dilaksanakan dengan serius berulang-ulang akan meningkatkan kekuatan serta ukuran otot. Banyak bentuk metode yang dapat digunakan untuk menambah beban otot secara efektif. Metode-metode ini berbeda dalam hal sifat resistensi eksternal tempat dimana otot berada. Resistensi luar menentukan jenis kontraksi otot yang ditampilkan misalnya kontraksi isometrik, isotonik atau isokinetik (Costill, 1979; Fox, 1988; Wilmore, 1994).

Pada kekuatan otot dikenal beberapa macam bentuk kekuatan. Harre (1982) telah membagi kekuatan otot menjadi tiga macam yaitu: kekuatan maksimal, kekuatan daya ledak dan kekuatan daya tahan.

Bompa (1990), mengemukakan tipe kekuatan sebagai berikut:

- a. Kekuatan umum yaitu kekuatan secara keseluruhan dari otot.
- b. Kekuatan khusus yaitu kekuatan yang berkenaan dengan otot yang digunakan dalam olahraga.
- c. Kekuatan maksimum yaitu kekuatan yang tinggi selama terjadi kontraksi yang maksimum.
- d. Power adalah hasil dari dua kemampuan yaitu kekuatan dan kecepatan untuk melakukan kekuatan dalam waktu yang singkat.
- e. Kekuatan absolut dan kekuatan relatif. Kekuatan absolut adalah kemampuan menggunakan kekuatan yang maksimum tanpa dipengaruhi berat beban, dan dapat diukur dengan menggunakan dynamometer.

O'Shea (1976), membagi kekuatan otot menjadi dua yaitu: kekuatan dinamis adalah menunjukkan dimana kekuatan otot dapat digunakan pada saat melakukan gerakan dalam bentuk kerja, contohnya mengangkat beban. Sedangkan kekuatan statis adalah penggunaan kekuatan otot yang tidak nampak pada saat melakukan gerakan atau kerja.

2.5.1 Metode latihan kekuatan

Pendekatan yang paling umum dalam latihan kekuatan adalah menggunakan beban dalam bentuk isotonik, isometrik dan isokinetik. Untuk pelaksanaan latihan kekuatan ada beberapa cara yang dikemukakan antara lain:

Nossek (1982) membagi bentuk latihan kekuatan sebagai berikut:

a. Metode repetisi (*repetition method*)

Jumlah ulangan : 1 - 10.

Jumlah seri : 3 - 8.

Intensitas : 70% - 100%.

b. Metode pemberian kekuatan maksimum (*the method of maximum strength impact*)

Jumlah ulangan : 1 - 5.

Jumlah seri : 3 - 6.

Intensitas : 85% - 100%.

c. Metode beban meningkat (*the method of gradually increased load*)

Metode ini disebut pyramide training, yaitu peningkatan beban latihan dan disertai dengan penurunan ulangan.

d. Metode penambahan dan penurunan beban secara bertahap (*the method of gradually increasing and decreasing load*)

Yaitu dengan cara beban meningkat ulangan dikurangi atau sebaliknya beban dikurangi ulangan ditambah.

e. Metode interval (*interval method*)

Metode ini terdiri dari:

Interval intensif.

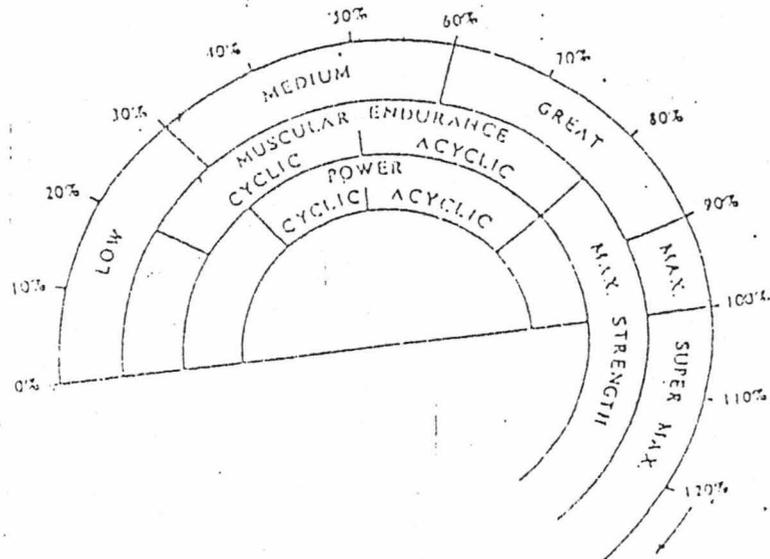
Interval ekstensif.

Metode latihan kekuatan yang dikemukakan ini masing-masing bervariasi pada beban, intensitas, ulangan, dan seri. Disesuaikan tujuan yang ingin dicapai. Perbedaan ini dapat dilihat pada tabel 2.5:

Tabel 2.5 Metode latihan kekuatan (Nossek, 1982)

Method	Intensi ty	Reperti tion	Series	Inter vals	Pace	Training Alm
Repetition method	85-100%	1 - 5	3 - 5	2-5 min	fluent	maximum and
	85- 95%	3	5 - 8		explo	explosive
	80- 90%	5			sive	strenght.
Repetition method	70-85%	6 - 10	3 - 5	2-4 min	fluent	submaximum
					/slow	strenght
	70-80%					(Hypertro- phy). Explosive strenght.
Intensive interval method	50-75%	6 - 10	4 - 6	3-5 min	explo sive/ fast	explosive and speed strenght.
Extensive interval method	30-50%	6 - 12	4 - 6	2-5 min	explo sive/ fast	speed stre- nght (non cyclic and cyclic)
Extensive interval method	40-60%	10 - 20	1 - 5	30-90 sec	fast	strenght endurance and streng- ht endurance
Extensive interval method	25-40%	more than 30, 60% of the maximum	4 - 6	30-60 son	fluent/ fast	strenght endurance

Selain metode yang dikemukakan diatas, Bempa (1990), mengemukakan metode latihan kekuatan seperti pada gambar 2. berikut ini:



Gambar 2.11 Persentase pembebanan untuk mengembangkan kemampuan, (Bompa, 1990)

Pada gambar diatas dapat dilihat metode-metode untuk mencapai beberapa kemampuan fisik, dengan klasifikasi beban sebagai berikut:

- Super maksimum : 100% - keatas.
- Maksimum : 90% - 100%.
- Besar (*great*) : 60% - 90%.
- Menengah (*medium*) : 30% - 60%.
- Rendah (*low*) : 30% - kebawah.

Penelitian yang dilakukan oleh DeLorme (O'Shea, 1976), mengatakan bahwa untuk mengembangkan kekuatan otot yang paling baik adalah : 10 sampai 12 kali ulangan, 3 sampai 4 seri, dan beban maksimum.

Berdasarkan dengan hal tersebut diatas maka penelitian ini dipusatkan pada latihan beban 30% dan latihan beban 50% dari maksimum terhadap peningkatan kekuatan, daya ledak, dan hipertrofi otot tungkai, untuk menunjang peningkatan prestasi pada cabang olahraga yang membutuhkan kekuatan, daya ledak dan hipertrofi pada otot tungkai.

2.5.2 Faktor-faktor yang berpengaruh pada kekuatan

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan otot antara lain:

a. Ukuran otot

Beban latihan yang diberikan pada sekelompok otot akan mengakibatkan terjadinya adaptasi dan meningkatkan jumlah serabut otot yang mengakibatkan terjadinya pembesaran ukuran otot yang terlatih.

b. Faktor umur

Sampai umur 12 tahun peningkatan kekuatan otot laki-laki maupun perempuan sama. Sampai pada umur pubertas pada wanita masih terdapat peningkatan walaupun lebih sedikit bila dibandingkan dengan laki-laki. Kekuatan pada laki-laki maupun perempuan dicapai pada kira-kira umur 25 tahun, setelah itu terjadi penurunan.

c. Faktor jenis kelamin

Perbedaan kekuatan otot pada laki-laki dan perempuan disebabkan karena perbedaan ukuran otot baik dalam besar maupun proporsinya dalam tubuh. Perbedaan ini tidak sama bagi semua kelompok otot.

Zetcyorsky (1968) mengatakan bahwa kekuatan otot menurut fungsinya dipengaruhi dua faktor yaitu:

a. Koordinasi otot

Suatu kelompok otot bekerja bersama-sama selama aktivitas berlangsung.

b. Koordinasi intramuskular

Kekuatan yang timbul tergantung dari unit neuromuskular yang bekerja secara bersamaan dalam suatu aktivitas.

McArdle (1981) menyatakan bahwa kekuatan otot tidak hanya dipengaruhi oleh besar kecilnya serta tipe dari otot itu sendiri, tetapi yang juga turut berperan dalam meningkatkan kekuatan otot adalah termasuk faktor saraf yang turut berperan dalam aktivitas otot. Selanjutnya Bomp (1990), dan Pate (1984), bahwa kekuatan maksimal dipengaruhi oleh intensitas rangsangan motor unit yang terlibat serta frekuensi rangsangan tersebut.

Fox (1981) mengatakan bahwa kekuatan dipengaruhi oleh sistem saraf yaitu: peningkatan jumlah motor unit yang terlibat dalam setiap kontraksi serta peningkatan rangsangan terhadap masing-masing motor unit. Selanjutnya Lamb, (1984) mengatakan bahwa kekuatan otot dipengaruhi pada jumlah motor unit yang dirangsang dalam otot dan frekuensi unit gerak yang melibatkan.

Terjadinya suatu peningkatan kemampuan otot dalam hal kekuatan, selanjutnya **Arnheim (1985)** berpendapat bahwa kekuatan otot dipengaruhi oleh adanya peningkatan besar otot serta jumlah kapiler pada otot. **Hazeldine (1985)** berpendapat bahwa adaptasi dari otot akan menyebabkan lebih responsif terhadap suatu rangsangan yang berasal dari sistem saraf pusat yang menyebabkan aktivitas otot efektif.

2.6 Hipertropi Otot

Aktivitas otot yang kuat menyebabkan meningkatnya jumlah dan ukuran miofibril dalam serabut otot yang disebut hipertrofi. Garis tengah tiap-tiap serabut otot meningkat, serta serabut-serabut memperoleh tambahan jumlah total miofibril dan berbagai nutrien, zat-zat seperti glikogen. Otot yang aktivitasnya rendah dan dalam waktu yang lama, tidak mengakibatkan terjadinya hipertrofi otot yang bermakna. Hipertrofi otot diakibatkan oleh suatu kegiatan atau latihan yang berintensitas tinggi, cepat dan singkat. Latihan kekuatan dengan menggunakan beban isokinetik dengan intensitas tinggi dan kecepatan rendah dapat meningkatkan hipertrofi otot, disertai dengan peningkatan sejumlah biokimia didalam glikogen otot, PC, ATP, ADP, kreatin, fosforilase, fosfofruktukinase (PFK), dan aktivitas enzim Krebs-cycle (**Brooks, 1984; Fox, 1988**).

2.6.1 Faktor yang mempengaruhi hipertrofi otot

Pertumbuhan dan perkembangan otot bergantung pada somatotropin. Setelah terjadi hipofisektomi, pertumbuhan otot pada hewan muda, tetapi dipulihkan dengan pemakian somatotropin (Virus, 1985). Situasi yang berbeda dilaporkan sehubungan dengan hipertrofi yang diinduksi dengan kerja. Dengan menyelidiki permasalahan ini Goldberg menginduksi hipertrofi kompensatori dari otot soleus dan otot plantaris pada satu anggota tubuh dengan memotong tendon otot sinergistik, gastroknemius. Dalam satu minggu berat plantaris meningkat sekitar 20 persen dan berat soleus sekitar 40 persen. Telah ditunjukkan secara histologis bahwa hasil berat otot terkait dengan kenaikan diameter serabut otot. Pada tikus yang dihipofisektomi sebelumnya diungkapkan bahwa ada dua tipe perkembangan otot ialah (1) perkembangan otot yang bergantung pada somatotropin pada hewan muda, dan (2) hipertrofi yang diinduksi kerja, tidak tergantung pada somatotropin. Somatotropin dapat menstimulasi sintesa protein pada otot rangka, dan meningkatkan hipertrofi pada otot. Namun demikian hipertrofi otot yang distimulasi oleh somatotropin tidak terkait dengan peningkatan kekuatan. Somatotropin mereduksi hilangnya berat bersih dalam denervasi otot soleus dan otot plantaris pada tikus yang dihipofisektomi. Hormon menaikkan ukuran denervasi otot dan otot kontrol secara proposional. Hal serupa perlakuan somatotropin tampaknya juga menyebabkan pertumbuhan proposional pada otot-otot yang mengalami hipertrofi yang diinduksi kerja dan kontrol kolateralnya. Ditegaskan bahwa ukuran otot setidaknya ditentukan

oleh dua faktor yaitu: somatotropin dan kerja otot. Somatotropin tampaknya bekerja pada "*amplifying system*" (sistem penguatan) biokimia untuk anabolik sel dan menentukan perubahan pada ukuran otot yang disebabkan oleh perubahan pada kerja otot.

Mekanisme kerja somatotropin pada sintesa protein pada otot melalui sintesa ornithine decarboxylate. Enzim ini mengkatabolisir permulaan sederatan reaksi yang menyebabkan pembentukan polyamines, dan spermidine. Mereka ini adalah faktor prolifirasi dan sintesa protein. Selama latihan, metabolisme ornithine diaktifkan bersama-sama dengan menaikkan hasil spermidine dan spermine. Ini mungkin akibat dari meningkatnya sekresi somatotropin (Virus, 1985).

Tiroksin dan triiodotironin menstimulasi sintesa dan degradasi protein pada otot-otot. Pelatihan (lari) dengan beban semakin meningkat secara bertahap menyebabkan perolehan yang bermakna pada kelompok otot gastrocnemius-plantaris. Pengaruh stimulasi tiroksin terhadap pemasukan asam amino ke dalam protein sebagaimana yang berlaku dalam mikrosom bergantung pada perbedaan mitokondria dan substrat yang bisa dioksidasikan (Virus, 1985; McCullagh, 1997).

Androgen mempunyai fungsi dalam hipertrofi otot. Intake atau injeksi sediaan androgen dari kerja anabolik menjadi populer diantara atlet dengan tujuan meningkatkan efisiensi pelatihan untuk meningkatkan kekuatan. Androgen lebih banyak memiliki perluasan kerja metabolisme protein pada otot daripada stimulasi anabolisme. Penggunaan testosteron menghambat kenaikan aktivitas alkaline proteolitik dari otot soleus yang diinduksi

oleh latihan ketahanan. Namun demikian pengaruh regulasi ini tidak hanya menghambat degradasi protein (Virus, 1985; McCullagh, 1997).

2.6.2 Adaptasi sintesa protein

Latihan yang berat akan merangsang produksi sejumlah aktin, miosin, dan protein miofibril lainnya dalam jumlah yang lebih banyak, sehingga tersedia jumlah crossbridge yang lebih banyak pula untuk menghasilkan kekuatan, (Lamb, 1984). Sebaliknya latihan ketahanan cenderung meningkatkan produksi enzim yang terlibat dalam penyediaan energi untuk metabolisme aerobik. Penambahan protein dalam miofibril yang disebabkan oleh latihan ketahanan yang berat diakibatkan pertambahan sintesa protein dari asam amino yang dibawa ke otot. Jumlah asam amino dari darah ke dalam otot mengalami depresi selama latihan. Perubahan lokal dalam membran otot yang disebabkan oleh kontraksi otot yang kuat yang membuat membran menjadi lebih mudah dilwati oleh asam amino sehingga akan lebih mudah berdifusi dari cairan ringan masuk ke sel otot yang akan menjadi kerangka dasar dari sintesa protein. Perubahan mekanis dalam bentuk molekul dalam membran otot akibat tegangan pada membran selama kontraksi berlangsung dapat menjadi faktor inisiasi dalam menstimulasi jumlah asam amino ke dalam serabut otot dan akan bekerja sama dengan miofibril protein. Hipertrofi otot lebih banyak memiliki aktifitas seperti somatomedin. Somatomedin adalah zat yang menyerupai hormon dalam tubuh yang meningkatkan pertumbuhan (Brooks, 1984; Virus, 1985; Fox, 1988).

2.6.3 Latihan dan sintesa protein

Latihan menimbulkan akumulasi metabolit dan meningkatkan output hormon, yang bersama-sama menghasilkan sintesa adaptif protein. Akibat dari sintesa ini jumlah molekul-molekul dari berbagai enzim meningkat dan massa struktur subselluler membesar, dan menjadi lebih kuat. Hipertrofi otot yang diinduksi oleh latihan terkait dengan kenaikan kadar protein otot. Khususnya kadar protein miofibril meningkat. Perubahan dalam kadar protein otot bergantung pada spesifikasi latihan yang digunakan. Hipertrofi otot yang serius ditunjukkan karena latihan kekuatan. Meningkatnya kadar miosin dengan latihan jangka pendek pada kecepatan gerakan yang tinggi dan khususnya pada penampilan sistematik latihan kekuatan. Kadar protein stroma meningkat hanya setelah latihan kekuatan. Salah satu dari akibat latihan jangka panjang yang dilakukan dengan sistematik adalah perubahan pada mitokondria otot. Perubahan tersebut berkurang setelah pelaksanaan latihan jangka pendek yang sistematik dengan intensitas yang tinggi. Perubahan kadar protein otot gastroknemius bergantung pada cara beban latihan dinaikkan (Brooks, 1984; Viru, 1985).

Golberg menunjukkan bahwa peningkatan pemasukan C-leucine ke dalam protein soleus dan otot plantaris selama pertumbuhan pada otot yang sinergis dengan gastroknemius. Pada eksperimen selanjutnya dia mendapatkan bukti yang menunjukkan bahwa hipertrofi otot rangka yang terinduksi oleh kerja terkait dengan menurunnya katabolisme protein serta bertambahnya sintesa protein baru. Baik pada otot rangka maupun pada otot jantung (Viru, 1985; McCullagh, 1997).

2.6.4 Pengaruh endokrin

Endrokin tidak menghasilkan aktivitas selluler baru, tetapi merubah tingkat aktivitas spesifik yang telah ada pada sel-sel. Endokrin bekerja dengan cara sebagai berikut : (1) mengubah tingkat sintesa enzim protein, (2) mengubah tingkat sintesa molekul-molekul seperti Cyclic adenosine monophosphate (cAMP) atau prostaglandin yang pada gilirannya menyebabkan perubahan aktivitas enzim atau permeabilitas sel membran pada zat-zat yang penting, dan (3) mengubah langsung permeabilitas sel membran (Brooks, 1984; Viru, 1985; Guyton, 1996).

Peningkatan hormon pertumbuhan dengan latihan akan bermanfaat karena pengaruh hormon pertumbuhan terhadap jaringan penyangga dan pertumbuhan otot. Pengaruh ini adalah kekuatan tendon, ligamen, dan otot yang lebih besar, pada mereka yang terlatih fisiknya. Hormon pertumbuhan membantu memobilisir asam lemak dari simpanan jaringan lemak dan menaikkan jumlah asam lemak dalam darah. Ini menjadi respon yang bermanfaat selama latihan untuk membantu menyediakan bahan bakar untuk jaringan yang sedang bekerja. Separuh dari hormon pertumbuhan yang baru disekresikan oleh lever sekitar 17 sampai 45 menit, sehingga bagian penting dari hormon tetap ada dalam darah, dalam waktu yang cukup lama untuk berpengaruh terhadap pertumbuhan jaringan dan mobilisasi asam lemak. Hormon pertumbuhan secara langsung meningkatkan pengangkutan asam amino melewati membran sel ke bagian dalam sel yang mengakibatkan konsentrasi asam amino didalam sel yang berperan terhadap meningkatnya sintesis protein. Hormon pertumbuhan mempunyai tiga pengaruh

utama terhadap metabolisme glukosa didalam sel yaitu:

(1) mengurangi pemakaian glukosa untuk mendapatkan energi (2) meningkatkan penumpukan glikogen didalam sel, dan (3) mengurangi penyerapan glukosa oleh sel (Fox, 1988; Guyton, 1996).

2.6.5 Pengaruh latihan terhadap hipertrofi otot

Aktifitas otot yang kuat menyebabkan meningkatnya jumlah dan ukuran miofibril dalam serabut otot yang disebut hipertrofi otot. Garis tengah tiap-tiap serabut otot meningkat, serta serabut otot memperoleh tambahan jumlah total miofibril serta berbagai nutrien dan zat-zat metabolisme seperti ATP, glikogen. Jadi hipertrofi otot adalah meningkatkan daya gerak otot dan mekanisme nutrien untuk mempertahankan peningkatan daya gerak. Otot yang aktivitasnya lemah dalam waktu yang lama tidak menyebabkan terjadinya hipertrofi pada otot yang bermakna. Hipertrofi terutama akibat dari aktifitas otot yang sangat kuat, walaupun aktifitas hanya terjadi beberapa menit setiap harinya (Brooks, 1984; Viru, 1985; Guyton, 1996).

Berkembangnya otot rangka sebagai akibat latihan fisik disebabkan oleh hipertrofi serabut tunggal dan bukan oleh bertambahnya jumlah serabut. Namun sejumlah penelitian menunjukkan kemungkinan bahwa serabut otot membelah secara longitudinal selama pelatihan dengan penambahan resultan dalam jumlah serabut. Jumlah serabut tersebut dianalisa dengan memotong otot bergaris (cross-section muscle) yang tipis dan menghitung jumlah serabut (Lamb, 1984) .

2.6.6 Adaptasi dalam sintesa protein dan degradasi

Penelitian telah menunjukkan bahwa latihan yang berat akan merangsang produksi jumlah aktin, miosin dan protein miofibril lainnya dalam jumlah yang lebih besar, sehingga tersedia banyak cross-bridge untuk menghasilkan kekuatan selama upaya kekuatan maksimal. Sebaliknya latihan ketahanan cenderung meningkatkan produksi enzim yang terlibat dalam penyediaan energi untuk metabolisme aerobik. Penambahan dalam protein miofibril yang disebabkan oleh latihan ketahanan yang berat dapat dianggap sebagai akibat dari pertambahan tingkat sintesa protein dari asam amino yang dikirimkan ke otot. Jumlah asam amino dari darah ke dalam otot mengalami depresi selama latihan nilainya bertambah melebihi nilai saat istirahat. Barangkali terdapat perubahan lokal dalam membran otot yang disebabkan oleh kontraksi berat yang membuat membran menjadi lebih mudah diliwati oleh asam amino sehingga akan lebih mudah berdifusi dari cairan ringan masuk ke sel otot yang akan menjadi kerangka dasar sintesa protein. Suatu perubahan mekanis dalam bentuk molekul dalam membran otot akibat tegangan pada membran selama kontraksi terjadi dapat menjadi faktor inisiasi yang terpenting dalam menstimulasi jumlah asam amino ke dalam serabut otot dan akan bekerja sama dengan miofibril protein. Mekanisme demikian sangatlah spekulatif, tetapi telah diduga karena regangan serabut otot terjadi dalam sintesa protein yang bertambah dalam serabut-serabut tersebut. Telah ditunjukkan bahwa otot hipertrofi lebih banyak memiliki aktifitas seperti somatomedine dibandingkan dengan otot kontrol. Somatomedine adalah zat yang menyerupai hormon dalam tubuh yang meningkatkan

pertumbuhan, ambilan asam amino, dan ambilan glukosa dalam otot rangka. Karena itu bertambahnya produksi atau pelepasan somatomedine mungkin dapat menjelaskan hipertrofi otot (Virus, 1985; Fox, 1988; Guyton, 1996).

2.6.7 Latihan kekuatan dan hipertrofi otot

Dua dari pertanyaan yang paling umum yang dihadapi oleh para atlet atau pelatih adalah; "Bagaimana saya dapat membentuk otot-otot, sehingga saya tidak kelihatan sangat kurus"? dan "Bagaimana saya menghindari pembesaran otot yang jelek bila saya mulai berlatih"? Pertanyaan pertama ini biasanya timbul pada laki-laki dan pertanyaan kedua oleh wanita. Jawaban yang tepat tidak mudah diberikan. Peningkatan kumpulan otot atau hipertrofi dapat menyertai segala bentuk latihan yang berlebihan (overload), namun sangat bervariasi baik dalam kaitannya dengan bertambahnya ukuran tersebut. Tiga prinsip utama sehubungan dengan hipertrofi dapat diperoleh dari literatur penelitian dan dengan mengamati pengaruh program latihan kekuatan pada berbagai kelompok orang. Pertama, ada perbedaan individu yang besar dalam mengadaptasi otot dengan pelatihan, dimana wanita biasanya menunjukkan hipertrofi yang lebih kecil daripada laki-laki, yang mungkin berkaitan dengan perbedaan hormon seks laki-laki. Jadi sebagian besar wanita tidak perlu khawatir tentang membesarnya otot-otot mereka secara tidak proporsional dan beberapa laki-laki dapat menghasilkan gumpalan otot dalam jumlah yang sangat kecil, tanpa mengabaikan tipe atau jumlah latihan kekuatan yang mereka lakukan. Kedua, hipertrofi terbesar biasanya ditunjukkan oleh otot-otot yang dalam kehidupan

sehari-hari kurang bekerja sehubungan dengan potensi genetiknya. Beberapa pencapaian tercapai dalam ukuran otot dilaporkan pada orang yang ototnya atrofi karena perawatan di rumah sakit terlalu lama. Mereka yang jarang melakukan kerja keras sering menunjukkan pertumbuhan yang besar dari ototnya setelah berlatih secara overload. Pada otot-otot yang lebih besar seperti pektoralis mayor dan quadriseps femoris biasanya menunjukkan perubahan ukuran yang lebih besar daripada otot-otot yang lebih kecil seperti otot lengan. Ketiga, tingkatan dimana suatu otot dalam pencapaian individu tertentu tergantung tidak hanya pada besarnya beban tetapi juga pada lama latihan. Oleh sebab itu sebagian besar penelitian pada masalah ini menunjukkan bahwa latihan isometrik dengan beban yang berat, tidak efektif untuk menghasilkan hipertrofi otot, bila dibandingkan dengan latihan isotonik. Latihan biasanya lebih ringan tetapi waktu kontraksinya lebih lama. Sekalipun dalam kategori latihan isotonik, nampaknya bahwa semua orang yang berlatih 10 sampai 20 repetisi maksimum (RM) lebih baik untuk mengembangkan otot daripada latihan 1 sampai 6 RM. Namun perlu dicatat bahwa setiap individu mempunyai variasi dalam adaptasi terhadap program latihan dan banyak sekali pengecualian dalam prinsip latihan (Fox, 1988; Mirkin, 1988; Guyton, 1996).



BAB 3
Kerangka Konseptual
Dan Hipotesis