



BAB I

SISTEM KONDUKSI JANTUNG

Oleh : Mokhtar Jamil, M.Kep

A. Sejarah EKG

EKG adalah grafik yang dibuat oleh sebuah elektrokardiograf, yang merekam aktivitas kelistrikan jantung dalam waktu tertentu. Namanya terdiri atas sejumlah bagian yang berbeda: elektro, karena berkaitan dengan elektronika, kardio, kata Yunani untuk jantung, gram, sebuah akar Yunani yang berarti “menulis”. Analisis sejumlah gelombang dan vektor normal depolarisasi dan repolarisasi menghasilkan informasi diagnostik yang penting. Beberapa fungsi adalah menentukan standar untuk mendiagnosis aritmia jantung, memandu tingkatan terapi dan risiko untuk pasien yang dicurigai ada infark otot jantung akut, membantu menemukan gangguan elektrolit (misalnya:hiperkalemia dan hipokalemia), memungkinkan penemuan abnormalitas konduksi.

EKG juga digunakan sebagai alat tapis penyakit jantung iskemik selama uji stres jantung dan kadang berguna untuk mendeteksi penyakit bukan jantung (misalnya:emboli paru atau hipotermia). Elektrokardiogram tidak menilai kontraktilitas jantung secara langsung. Namun, EKG dapat memberikan indikasi menyeluruh atas naik-turunnya suatu kontraktilitas.

Sejarah EKG berawal pada tahun 1872 di *St. Bartholomew's Hospital* seorang mahasiswa bernama *Alexander Muirhead* menghubungkan kabel ke pergelangan tangan pasien yang sakit untuk memperoleh rekaman detak jantung pasien. Aktivitas ini direkam secara langsung dan divisualisasikan menggunakan elektrometer kapiler Lippmann oleh seorang fisiolog Britania bernama *John Burdon Sanderson*. Orang pertama

Cara Mudah Belajar EKG dan Aplikasinya

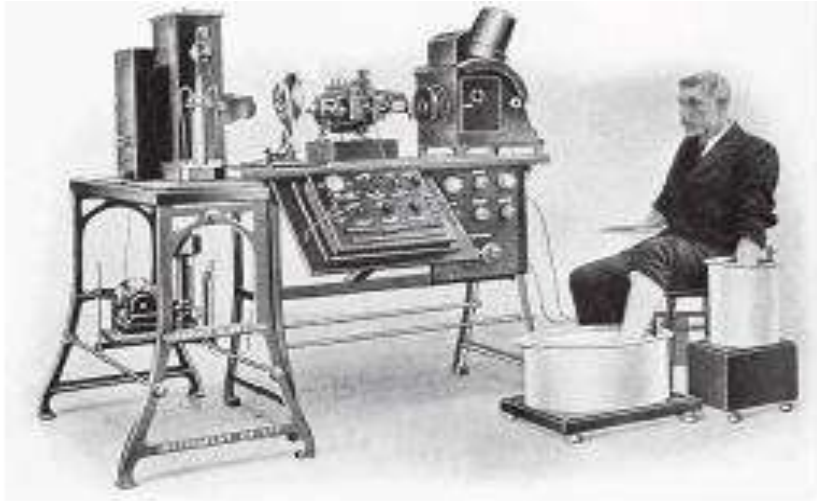
yang mengadakan pendekatan sistematis pada jantung dari sudut pandang listrik adalah *Augustus Waller*, yang bekerja di St. Mary's Hospital di Paddington, London. Mesin elektrokardiografinya terdiri atas elektrometer kapiler Lippmann yang dipasang ke sebuah proyektor. Jejak detak jantung diproyeksikan ke piringan foto yang dipasang ke sebuah kereta api mainan. Hal ini memungkinkan detak jantung untuk direkam dalam waktu yang sebenarnya. Pada tahun 1911 ia masih melihat karyanya masih jarang diterapkan secara klinis. Fenomena bahwa arus listrik diproduksi ketika terjadi kontraksi jantung sudah beredar luas, tetapi tidak bisa diukur akurat tanpa menempatkan elektroda secara langsung di atas jantung.

Pada tahun 1901 muncullah gebrakan baru yang bermula saat seorang dokter Belanda yang lahir di Indonesia tepatnya di Kota Semarang yang bernama *Willem Einthoven*, yang bekerja di Leiden, Belanda, ia menggunakan galvanometer senar yang ditemukannya pada tahun 1901, yang lebih sensitif daripada elektrometer kapiler yang digunakan *Waller*. Einthoven menyelesaikan serangkaian prototipe string galvanometer pada tahun 1901. Perangkat ini menggunakan filamen konduktif yang sangat tipis diantara kawat yang memiliki elektromagnet yang sangat kuat. Medan elektromagnetik akan menyebabkan string bergerak saat arus dilewatkan melalui filamen. String ini akan memberi bayangan pada peran kertas foto yang bergerak saat itu sebuah cahaya bersinar.



Perekaman EKG pertama kali menggunakan mesin seberat 600 pon dan memerlukan 5 orang untuk

mengoperasikannya. Sebagai elektroda digunakan cairan garam yang dipasang pada kaki dan tangan.



Gambar 1.1. Galvanometer (Sumber : Sajjan, 2013)

Einthoven menuliskan huruf P, Q, R, S dan T ke sejumlah defleksi, dan menjelaskan sifat-sifat elektrokardiografi sejumlah gangguan kardiovaskuler. Pada tahun 1924, ia dianugerahi Penghargaan Nobel dalam Fisiologi atau Kedokteran untuk penemuannya

B. Anatomi dan Fisiologi Jantung

Jantung adalah organ berbentuk kerucut dan berotot yang terletak di dada, di tengah mediastinum (rongga di antara paru-paru kanan dan kiri) dibelakang tulang dada. Karena letak jantung berada diantara paru-paru, paru-paru kiri menjadi lebih kecil daripada paru-paru kanan karena memiliki tekukan kardiak untuk mengakomodasi jantung.

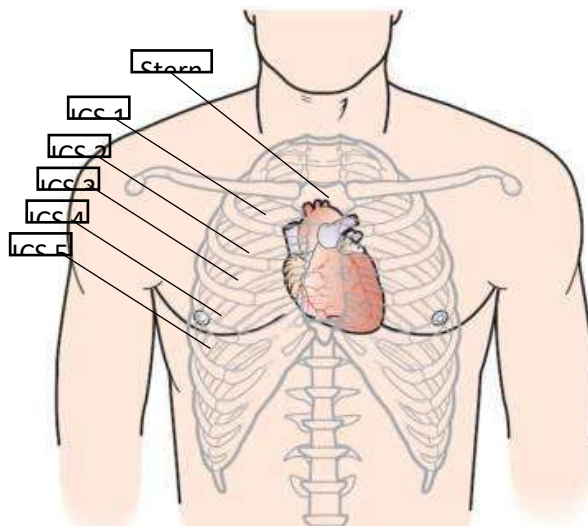
antara paru-paru, dan di depan tulang belakang. Jantung terletak miring di area ini seperti segitiga terbalik. Bagian atas jantung, atau dasarnya, terletak tepat di bawah tulang rusuk kedua; bagian bawah dari hati, atau

puncaknya, miring ke depan dan ke bawah, ke arah kiri sisi tubuh, dan terletak pada diafragma.

Jantung orang dewasa memiliki berat 250 sampai 350 gram. Umumnya jantung berukuran panjang 12 cm, lebar 8 cm, dan ketebalan 6 cm. Ukuran bervariasi dipengaruhi oleh ukuran tubuh, umur, seks, dan aktifitas fisik. Atlet terlatih bisa memiliki ukuran jantung yang lebih besar sebagai akibat dari latihannya yang memicu otot jantung berkembang mirip seperti perkembangan otot rangka.

1. Posisi Jantung

Bagian atas jantung terletak dibagian bawah sternal notch, 1/3 dari jantung berada disebelah kanan dari midline sternum , 2/3 nya disebelah kiri dari midline sternum. Sedangkan bagian apek jantung di interkostal ke-5 atau tepatnya di bawah puting susu sebelah kiri. seperti yang terlihat di gambar 2.3

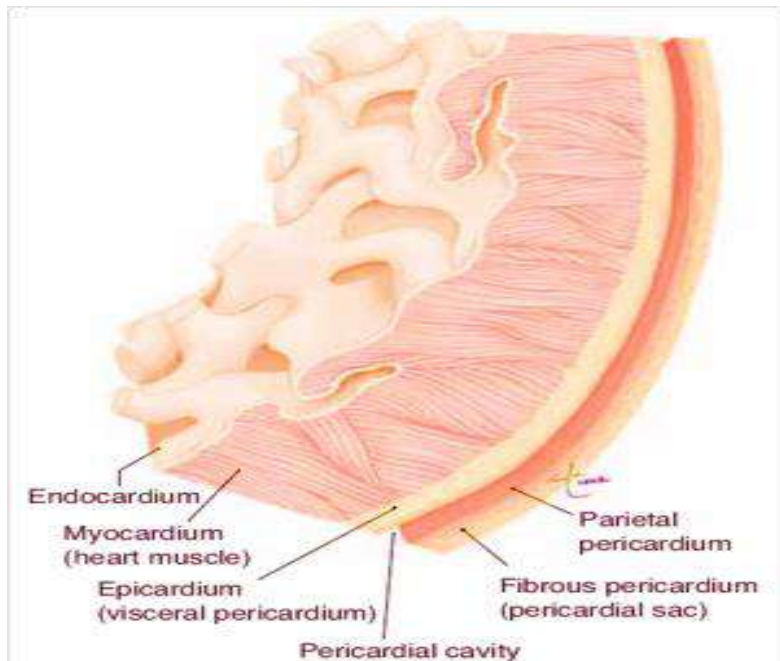


Gambar 1.2. Letak Jantung (Sumber : Sajjan, 2013)

2. Lapisan Jantung

Dinding jantung terdiri dari tiga lapisan: epikardium, miokardium, dan endokardium. (1) Epikardium, lapisan luar dan lapisan viseral lapisan serosa perikardium), terdiri dari sel epitel skuamosa yang di atasnya jaringan ikat, (2) Miokardium, lapisan tengah, membentuk bagian terbesar dari dinding jantung. Lapisan jaringan otot ini berkontraksi dengan setiap detak jantung, (3) Endokardium, jantungnya lapisan paling dalam, mengandung jaringan endotel dengan pembuluh darah kecil dan bundel otot polos. Jantung dibungkus oleh lapisan oleh Pericardium yang mengelilingi jantung, pericardium terdiri dari 3 lapisan yaitu (a) Lapisan fibrosa, yaitu lapisan paling luar pembungkus jantung yang melindungi jantung ketika jantung mengalami overdistention. Lapisan fibrosa bersifat sangat keras dan bersentuhan langsung dengan bagian dinding dalam sternum rongga thorax, disamping itu lapisan fibrosa ini termasuk penghubung antara jaringan, khususnya pembuluh darah besar yang menghubungkan dengan lapisan ini (exp: vena cava, aorta, pulmonal arteri dan vena pulmonal). (b) Lapisan parietal, yaitu bagian dalam dari dinding lapisan fibrosa, (c) Lapisan Visceral, lapisan perikardium yang bersentuhan dengan lapisan luar dari otot jantung atau epikardium. Diantara lapisan pericardium parietal dan lapisan perikardium visceral terdapat ruang atau space yang berisi pelumas atau cairan serosa atau yang disebut dengan cairan perikardium. Cairan perikardium berfungsi untuk melindungi dari gesekan-gesekan yang berlebihan saat jantung berdenyut atau berkontraksi. Banyaknya cairan perikardium ini antara 15 – 50 ml, dan tidak boleh

kurang atau lebih karena akan mempengaruhi fungsi kerja jantung



Gambar 1.3. Lapisan Otot Jantung (Sumber : Sajjan, 2013)

3. Katup Jantung

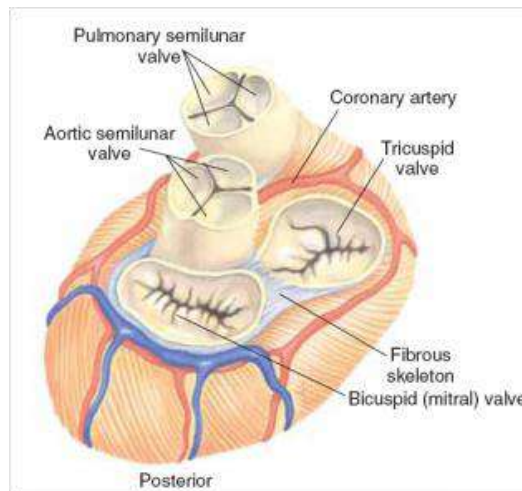
Katup jantung terbagi menjadi 2 bagian, yaitu katup yang menghubungkan antara atrium dengan ventrikel dinamakan katup atrioventrikuler, sedangkan katup yang menghubungkan sirkulasi sistemik dan sirkulasi pulmonal dinamakan katup semilunar.

Katup atrioventrikuler terdiri dari katup trikuspid yaitu katup yang menghubungkan antara atrium kanan dengan ventrikel kanan, katup atrioventrikuler yang lain adalah katup yang menghubungkan antara atrium kiri dengan ventrikel kiri yang dinamakan dengan katup mitral atau bicuspid.

Cara Mudah Belajar EKG dan Aplikasinya

Katup semilunar terdiri dari katup pulmonal yaitu katup yang menghubungkan antara ventrikel kanan dengan pulmonal trunk, katup semilunar yang lain adalah katup yang menghubungkan antara ventrikel kiri dengan asendence aorta yaitu katup aorta.

Katup berfungsi mencegah aliran darah balik ke ruang jantung sebelumnya sesaat setelah kontraksi atau sistolik dan sesaat saat relaksasi atau diastolik. Tiap bagian daun katup jantung diikat oleh chordae tendinea sehingga pada saat kontraksi daun katup tidak terdorong masuk keruang sebelumnya yang bertekanan rendah. Chordae tendinea sendiri berikatan dengan otot yang disebut muskulus papilaris. Lebih jelasnya ketika melihat gambar dibawah ini, , katup trikuspid 3 daun katup (tri =3), katup aortadan katup pulmonal juga mempunyai 3 daun katup. Sedangkan katup mitral atau biskupid hanya mempunyai 2 daun katup.



Gambar 1.4. Katub Jantung (Sumber : Sajjan, 2013)

4. Otot Jantung

Sifat otot jantung:

- Automatisasi (mampu menghasilkan impuls spontan)
- Conductivity (mampu menghantarkan impuls)
- Excitability (mampu berespon terhadap rangsang)

5. Kelistrikan Jantung

Kontraksi sel otot jantung terjadi oleh adanya potensial aksi yang dihantarkan sepanjang membrane sel otot jantung. Jantung akan berkontraksi secara ritmik, akibat adanya impuls listrik yang dibangkitkan oleh jantung sendiri yang disebut *autorhythmicity*. Sifat ini dimiliki oleh sel khusus otot jantung. Terdapat dua jenis khusus sel otot jantung, yaitu: sel kontraktil dan sel otoritmik. Sel kontraktil melakukan kerja mekanis, yaitu memompa dan sel otoritmik mengkhususkan diri mencetuskan dan menghantarkan potensial aksi yang bertanggung jawab untuk kontraksi sel-sel pekerja.

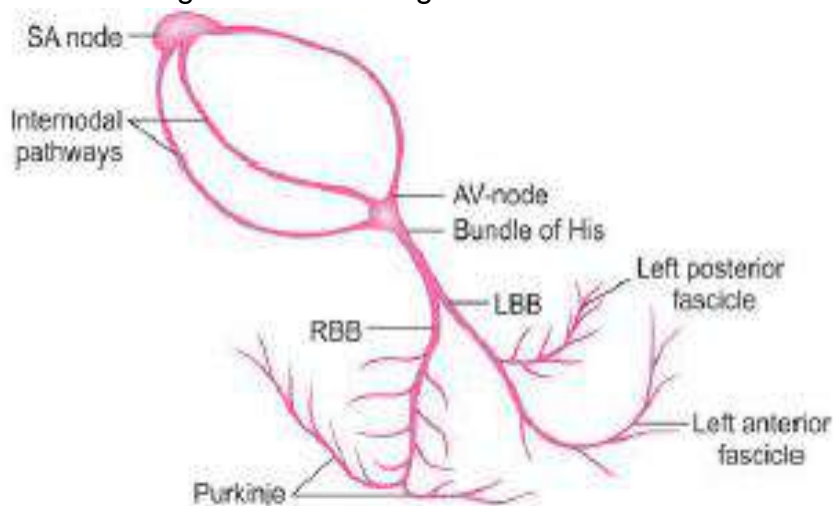
Sel-sel jantung yang mampu mengalami otoritmisitas ditemukan di lokasi-lokasi berikut:

1. Nodus sinoatrium/Sinoatrial Node (*SA Node*), daerah kecil khusus di dinding atrium kanan dekat lubang vena kava superior.
2. Nodus atrioventrikel/Atrioventricular Node (*AV Node*), sebuah berkas kecil sel-sel otot jantung khusus di dasar atrium kanan dekat septum, tepat di atas pertautan atrium dan ventrikel.
3. Berkas HIS / (*bundle of HIS*), suatu jaras sel-sel khusus yang berasal dari nodus AV dan masuk ke septum antar ventrikel, tempat berkas tersebut bercabang membentuk berkas kanan dan kiri yang berjalan ke bawah melalui

seputum, melingkari ujung bilik ventrikel dan kembali ke atrium di sepanjang dinding luar.

4. Left bundle branch (LBB) and right bundle branch (RBB), merupakan percabangan dari bundle of HIS ke kiri dan ke kanan.
5. Serabut *Purkinje*, serat-serat halus yang berjalan dari berkas HIS dan menyebar ke seluruh miokardium ventrikel seperti ranting-ranting pohon.

Sel-sel jantung yang mempunyai sifat otoritmik digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1.5. Jalur Kelistrikan Jantung

6. Pacemaker Jantung

a. Sinoatrial Node (SA Node)

Adalah normal pacemaker jantung. SA Node terletak di atrium kanan bagian atas dan dekat dengan ostium vena cava superior. Sumber pacemaker selain dari SA Node bisa dikatakan sebagai pacemaker abnormal atau salah satu dari ciri aritmia/disritmia jantung pada gambar EKG. Untuk menjalankan fungsinya sebagai pacemaker normal jantung, SA Node

dipengaruhi oleh autonomic nervous system yaitu aktivitas simpatis dan parasimpatis. Adanya peningkatan kerja SA Node (peningkatan denyut jantung) dan sebaliknya adanya aktivitas parasimpatis akan menurunkan kerja SA Node (penurunan denyut jantung)

b. Atrioventrikular Node (AV Node)

AV Node adalah sumber pacemaker kedua setelah SA Node. Ukuran AV node lebih kecil daripada SA Node, terletak di atrium kanan bagian bawah tepatnya dekat dengan katup trikuspidalis dan juga dekat dengan ostium sinus coronarius.

AV Node dibagi menjadi 3 bagian yaitu:

1. Atrionodal (AN), yaitu bagian paling atas dari AV Node. Pada bagian inilah impuls diterima dari atrial dan mempunyai kemampuan untuk mengeluarkan impuls secara otomatis.
2. Middle atau Nodal (N), yaitu bagian tengah dari AV node, pada bagian ini tidak mempunyai kemampuan mengeluarkan impuls. Tapi keistimewaan sebagai peredam atau menghambat impuls yang berlebihan yang berasal dari SA Node atau atrial sebelum diteruskan ke ventrikel.
3. Nodo-His (NH), yaitu bagian bawah dari AV node yang berhubungan langsung dengan bundle of HIS. Pada bagian inilah pusat impuls secara otomatis dikeluarkan. Selama aktivitas SA node tidak mengalami gangguan, maka otomatisasi yang dimiliki AV node tidak akan keluar. Tetapi jika SA Node mengalami gangguan atau impuls yang dikeluarkan lebih kecil dari pada AV

node, maka AV Node akan mengambil alih fungsi utama dari pacemaker. Normalnya, AV node mengeluarkan impuls antara 40-60 x / menit. Seperti halnya dengan SA Node, kecepatan impuls impuls yang dikeluarkan oleh AV Node tergantung dari aktivitas autonomik nervous system.

c. Serabut Purkinje

Serabut Purkinje dan otot ventrikel memiliki kemampuan mengeluarkan impuls secara spontan sebanyak 20-40 x / menit. Spontanitas impuls yang berasal dari serabut purkinje atau kedua otot ventrikel keluar apabila kedua pacemaker utama tidak sama skali bekerja, sehingga serabut purkinje atau kedua otot ventrikel akan mengambil alih sebagai pacemaker utama. Begitu juga dengan pacemaker pada daerah ini, kecepatan impuls bisa bertambah atau berkurang tergantung dari aktivitas autonomic nervous system.

Selain ketiga tempat sumber utama pacemaker yang sudah dijelaskan di atas, perlu diketahui juga bahwa apabila aktivitas sel-sel otot di tempat lain maka sel-sel otot atrial atau daerah sekitar AV Junction atau ventrikel bisa juga mengambil alih sebagai dominan pacemaker.

7. Sel-Sel Konduksi Jantung

Selain memiliki kemampuan untuk mengeluarkan impuls secara spontan, jantung juga memiliki keistimewaan yaitu memiliki sel-sel konduksi yang merupakan jaringan neuromuskuler yang membentuk lintasan khusus atau pathway dengan tujuan mendistribusikan spontan impuls

yang bersal dari SA Node ke AV Node, bundle of His dan serabut purkinje agar bisa merangsang seluruh sel-sel otot jantung mulai dari atrium sampai ventrikel sehingga jantung bisa berkontraksi. Jaringan neuromukuler tersebut lebih dikenal dengan nama sistem konduksi jantung.

Normalnya, sistem ini dimulai dari SA Node yang spontan mengeluarkan impuls, kemudian impuls ini akan menyebar ke semua sel otot atrium yang menyebabkan sel otot atrium berdepolarisasi dan berkontraksi. Setelah seluruh sel atrium terangsang dan berkontraksi impuls akan diteruskan ke ventrikel hanya melalui AV Node dan tidak ada jalan lain karena antara atrium dan ventrikel dibatasi oleh jaringan fibrous yang normalnya tidak bisa dilewati impuls kecuali ada kelainan.

Di AV Node, impuls akan ditahan sebentar untuk memberikan kesempatan kepada kedua ventrikel untuk mengisi darah sebelum berkontraksi. Saat setelah kedua impuls di AV node, impuls akan diteruskan ke bundle of His dan cabangnya yaitu *Left Bundle Branch* (cabang bundle of his sebelah kiri) yang akan merangsang sel-sel otot ventrikel kiri dan ke *Right Bundle Branch* (cabang bundle of his sebelah kanan) yang akan merangsang sel-sel otot ventrikel kanan. Setelah dari cabang ini, akan diteruskan ke serabut Purkinje yang menyebabkan kedua ventrikel secara bersamaan berdepolarisasi dan berkontraksi.

Berbagai sel penghantar khusus memiliki kecepatan pembentukan impuls spontan yang berlainan. Simpul SA memiliki kemampuan membentuk impuls spontan tercepat. Impuls ini disebarkan ke seluruh jantung dan menjadi penentu irama dasar kerja jantung, sehingga pada keadaan normal, simpul SA bertindak sebagai picu jantung.

Jaringan penghantar khusus lainnya tidak dapat mencetuskan potensial aksi intriksiknya karena sel-sel ini sudah diaktifkan lebih dahulu oleh potensial aksi yang berasal dari simpul SA, sebelum sel-sel ini mampu mencapai ambang rangsanganya sendiri.

Saat impuls muncul di SA node dan melintasi melalui atrium, menyebabkan terjadinya depolarisasi atrium. Dari impuls atrium mencapai AV node, di titik ini terjadi penundaan impuls karena perbedaan kecepatan impuls, penundaan ini akan memungkinkan atrium berkontraksi dan memompa darah ke dalam ventrikel. Impuls ini kemudian disebarkan di sepanjang *bundle of His*, ke *Left and Right Bundle Branch* dan akhirnya sampai ke serabut Purkinje menyebabkan depolarisasi ventrikel.

Berbagai sel penghantar khusus memiliki kecepatan pembentukan impuls spontan yang berlainan. Simpul SA memiliki kemampuan membentuk impuls spontan tercepat. Impuls ini disebarkan ke seluruh jantung dan menjadi penentu irama dasar kerja jantung, sehingga pada keadaan normal, simpul SA bertindak sebagai picu jantung. Jaringan penghantar khusus lainnya tidak dapat mencetuskan potensial aksi intriksiknya karena sel-sel ini sudah diaktifkan lebih dahulu oleh potensial aksi yang berasal dari simpul SA, sebelum sel-sel ini mampu mencapai ambang rangsanganya sendiri.

Urutan kemampuan pembentukan potensial aksi berbagai susunan penghantar khusus jantung yaitu:

- Nodus SA (pemacu normal) : 60-80 kali per menit
- Nodus AV : 40-60 kali per menit
- Berkas His dan serat purkinje : 20-40 kali per menit

C. Dasar Elektro Fisiologi Pada Jantung

1. Elektrofisiologi pada SA node

Aktifitas pada jantung sangat bergantung pada proses elektro fisiologi di dalamnya. Seperti yang telah disampaikan dalam bagian sebelumnya bahwa proses elektro fisiologi pada jantung diperankan oleh beberapa bagian yang saling berhubungan. Komponen tersebut meliputi SA node, AV node dan Serabut Purkinje. SA node merupakan inisiator utama dalam proses ini. Dalam keadaan normal, SA node mampu menghasilkan impuls dengan karakteristik reguler/ teratur dengan laju (HR /Hearth Rate) 60 – 100x/ menit.

Meskipun SA merupakan Pacemaker utama dalam system elektrifisiologi jantung, bagian ini pun dapat terpengaruh oleh system organ atau substansi lain baik secara fisiologis maupun patologis. Beberapa hal yang dapat mempengaruhi aktifitas pacemaker SA antara lain:

a) Autonomic Nervous System

Autonomic Nervous System merupakan bagian dari susunan syaraf pusat (Central Nervous System/ CNS) yang bertugas meregulasi fungsi tubuh secara otomatis/independen tanpa kita sadari. Autonomic Nervous System terbagi atas dua bagian yaitu syaraf sympatis dan parasympatis. Perubahan baik fisiologis maupun patologis dapat merangsang aktifnya syaraf simpatik dan para simpatik. Ketika syaraf simpatis aktif, maka akan diikuti dengan peningkatan aktifitas SA Node. Begitu pula ketika terjadi aktifasi syaraf

parasimpatis akan menurunkan aktifitas pada SA node.

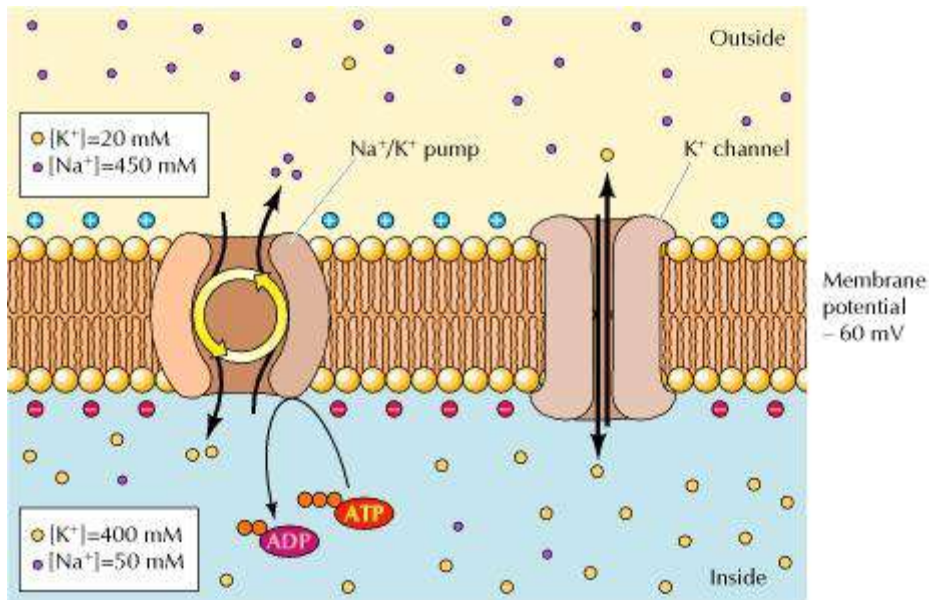
b) Keseimbangan Elektrolit

Keseimbangan elektrolit memegang peranan penting pada proses elektrofisiologi jantung. Melalui proses pembentukan potensial aksi, gradient konsentrasi antar ion elektrolit menghasilkan impuls listrik. Impul inilah yang kan dilepaskan dan dijalarkan sepanjang jalur kelistrikan jantung. Kalsium merupakan elektrolit utama yang sangat dominan pada SA node. Selain kalsium, kadar kalium (K^+) dan natrium (Na^+) bersama sama membentuk aksi potensial.

c) Nervous Vagus (Syaraf Kranial VII)

Nervous Vagus (Syaraf Kranial VII) dapat mempengaruhi kerja dari pacemaker jantung (SA Node). Stimulasi pada Nervous Vagus (Syaraf Kranial VII) seperti dengan melakukan pijatan pada nadi karotis dapat menurunkan aktifitas SA Node. Penurunan Aktifitas pada SA Node akan mengakitatnya menurunnya *Hearth Rate* (HR).

2. Elektro fisiologi pada otot jantung



Gambar 1.6. Membran Sel Jantung

(Sumber : <http://doctorsandhu.com/Neuron/Neuron.shtml>)

Proses elektrofisiologi pada jantung didasarkan pada proses pembentukan aksi potensial. Namun sebelum beranjak lebih jauh mengenai aksi potensial, kita terlebih dahulu harus memahami urutan proses aksi potensial. Aksi potensial terdiri atas:

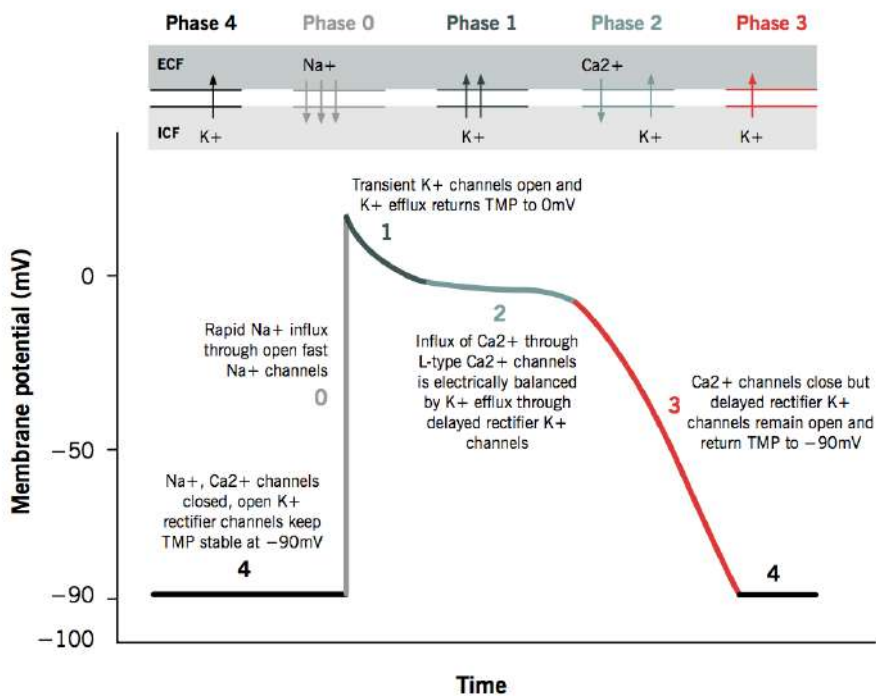
- **Polarisasi**
Merupakan muatan/tegangan listrik saat sel beristirahat. Tingkatan polarisasi / potensial resting membrane berbeda beda pada setiap bagian pacemaker.
- **Depolarisasi**
Depolarisasi merupakan fase saat neuron mengalami perangsangan kuat, permeabilitas membran sel terhadap ion Na^+

meningkat semakin tinggi sehingga ion Na^+ bergerak memasuki sitoplasma. Fenomena ini menyebabkan polaritas sitoplasma menjadi lebih positif.

- Repolarisasi
Repolarisasi merupakan proses kembalinya potensial membran yang ke nilai negatif tepat setelah fase depolarisasi dari potensial aksi telah mengubah potensial membran menjadi nilai positif (kembali ke potensial resting membrane -90mV).

Action potential of cardiac muscles

Grigoriy Ikonnikov and Eric Wong



Gambar 1.7. Potensial Aksi Otot Jantung
(Sumber: Nerbonne, JM. 2005)

Berbeda dengan sel saraf dan sel otot rangka, sel-sel khusus jantung tidak memiliki potensial

membrane istirahat. Sel-sel ini memperlihatkan aktivitas pacemaker berupa depolarisasi lambat yang diikuti oleh potensial aksi apabila potensial membrane tersebut mencapai ambang tetap. Dengan demikian, timbulkah potensial aksi secara berkala yang akan menyebar ke seluruh jantung dan menyebabkan jantung berdenyut secara teratur tanpa adanya rangsangan melalui saraf.

Adapun proses potensial aksi yang terjadi pada otot jantung melalui beberapa tahapan mekanisme sebagai berikut:

a) Tahap 4: Fase istirahat

Sel otot jantung (Cardiomyocyte) memiliki potensial membrane istirahat (*Potential resting Membrane*) sebesar -90 mV . Fase ini terjadi kebocoran konstan dari ion K^+ melalui saluran searah ke bagian dalam sel .di sisi lain saluran Na^+ dan Ca^{2+} ditutup pada TMP (*Tras Membran Potential*) pada fase ini.

b) Tahap 0: Depolarisasi

Potensial aksi yang muncul pada cardiomyocyte atau *pacemaker* dan sel sel sekitarnya secara bersama sama menyebabkan TMP naik di atas -90 mV (Menjadi lebih positif). Saluran Na^+ membuka secara cepat yang diikuti dengan masuknya Na^+ ke dalam sel, yang menyebabkan TMP naik mendekati -70 mV yang merupakan ambang potensial dalam cardiomyocytes, Arus Na^+ yang besar dengan cepat mendepolarisasi TMP menjadi 0 mV dan sedikit di atas 0 mV untuk periode sementara (*overshoot*) yang selanjutnya diikuti penutupan cepat dari saluran Na^+

Dalam waktu yang bersamaan, saluran Ca^{2+} *L-type* ("*long-opening*") terbuka ketika

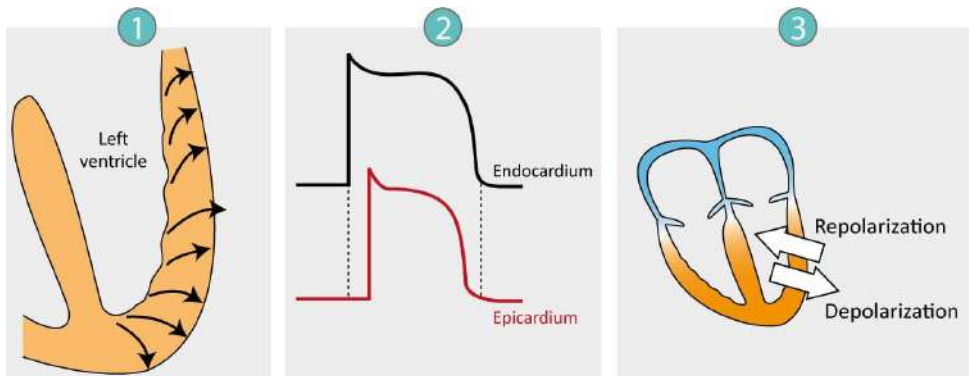
TMP lebih besar dari -40 mV dan menyebabkan masuknya Ca^{2+} ke bawah gradien konsentrasi.

- c) Tahap 1: Repolarisasi dini
Pada fase ini, TMP dalam keadaan positif. Beberapa saluran K^{+} terbuka sesaat yang berakibat mengembalikan TMP ke sekitar 0 mV.
- d) Tahap 2: Fase dataran tinggi
Saluran L-type Ca^{2+} masih terbuka pada fase ini, adanya arus kecil Ca^{2+} kecil yang konstan berperan penting dalam proses kopling eksitasi-kontraksi pada fase ini. Ion K^{+} bergerak keluar dan menurunkan gradien konsentrasinya melalui *delayed rectifier K^{+} channels*. Kedua arus balik diatas (Ca^{2+} dan K^{+}) menyebabkan keseimbangan secara elektrik, dan TMP dipertahankan di dataran tinggi tepat di bawah 0 mV sepanjang fase 2.
- e) Tahap 3: Repolarisasi
Pada fase ini, saluran Ca^{2+} secara bertahap tidak aktif. Aliran K^{+} yang berlangsung secara terus menerus, yang melebihi aliran Ca^{2+} , membawa TMP kembali ke potensial istirahat dari -90 mV. Dalam fase ini, cardiomyocyte menyiapkan sel untuk siklus depolarisasi selanjutnya. Gradien konsentrasi transmembran dipulihkan dengan mengembalikan ion Na^{+} dan Ca^{2+} ke lingkungan ekstraseluler, dan K^{+} ion ke intra seluler. Pompa yang terlibat termasuk sarcolemmal Na^{+} - Ca^{2+} exchanger, Ca^{2+} -ATPase dan Na^{+} - K^{+} -ATPase.

3. Prinsip kerja galvanometer

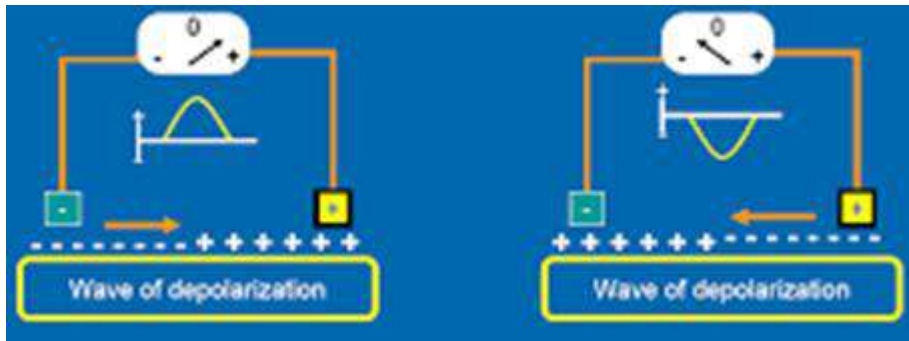
Secara umum, prinsip kerja galvanometer adalah dengan menangkap adanya perubahan muatan kelistrikan pada area dimana dia dipasang.

Sebelum beranjak lebih jauh, penangkapan bentuk gelombang galvano meter pada EKG/ EKG didasarkan pada prinsip berikut.



Gambar 1.8. Depolarisasi dan Repolarisasi

Prinsip pertama menyebutkan bahwa arah vektor listrik depolarisasi selalu mengarah dari bagian dalam jantung ke luar bagian jantung. Hal ini berarti, impuls listrik pada saat fase depolarisasi akan mendepolari endokardium terlebih dahulu sebelum mendepolarisasi epicardium. Vektor listrik pada depolarisasi berkebalikan dengan vektor listrik pada fase repolarisasi. Pada fase repolarisasi, vektor listrik akan mengarah dari bagian luar jantung menuju ke bagian dalam jantung. Fenomena ini menyebabkan galvano meter akan menangkap bentuk gelombang yang berbeda selama Fase tersebut. Perbedaan arah vektor ini mengacu kepada pergerakan ion positif pada membrane cardiomyocyte



Gambar 1.9. Vektor Depolarisasi

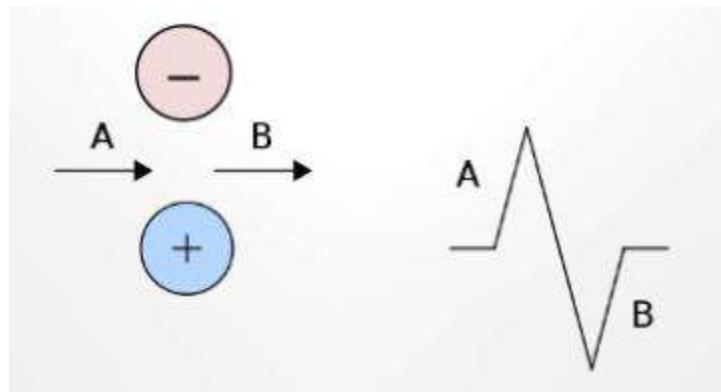
Pada saat fase depolarisasi berlangsung, vektor depolarisasi yang datang atau mengarah ke elektroda galvanometer menyebabkan perubahan polaritas dari negatif ke arah yang lebih positif. Fenomena tersebut menyebabkan elektroda galvanometer menangkap bentuk gelombang dengan defleksi positif. Hal sebaliknya terjadi apabila vektor depolarisasi meninggalkan elektroda galvanometer, elektroda tersebut akan menangkap bentuk gelombang negatif.



Gambar 1.10. Vektor Repolarisasi

Hal yang berkebalikan terjadi pada fase repolarisasi. Pada fase ini, ketika elektroda galvanometer menangkap adanya vektor repolarisasi yang mendekati elektroda galvanometer, elektroda tersebut akan menangkap bentuk gelombang negatif. Fenomena berkebalikan terjadi apabila elektroda galvanometer menangkap adanya gelombang vektor repolarisasi yang menjauhi elektrode.

Saat fase depolarisasi dan repolarisasi berlangsung secara simultan (terus menerus dan bergantian), elektroda galvanometer akan menangkap bentuk baik defleksi positif (dari gelombang depolarisasi / vektor A) dan defleksi negatif (dari gelombang repolarisasi/ Vektor B) yang mendekati elektroda tersebut. Bentuk ini disebut dengan bentuk gelombang *Bifasik*.



Gambar 1.11. Gelombang Bifasik

D. Sandapan Pada EKG

Terdapat 2 jenis sandapan (lead) pada EKG.

1. Sandapan Bipolar

Yaitu merekam perbedaan potensial dari dua elektroda, sandapan ini ditandai dengan angka romawi yaitu **I, II dan III.**

a. Lead I

Didapatkan rekaman listrik yang disadap pada elektrode tangan kanan dan tangan kiri.

b. Lead II

Didapatkan rekaman listrik yang disadap pada elektrode tangan kanan dan kaki kiri.

c. Lead III

Didapatkan rekaman listrik yang disadap pada elektrode tangan kiri dan kaki kiri.

2. Sandapan Unipolar

1) Sandapan Unipolar Ektremitas

Merekam besar potensial listrik pada satu ektremitas, elektroda eksplorasi diletakan pada ektremitas yg mau diukur. Gabungan elektroda-elektroda pada ektremitas yg lain membentuk elektroda indiferen (potensial 0) yaitu **aVR, aVL, aVF.**

a. AVR

Rekaman listrik yang disadap dari elektrode tangan kanan

b. AVL

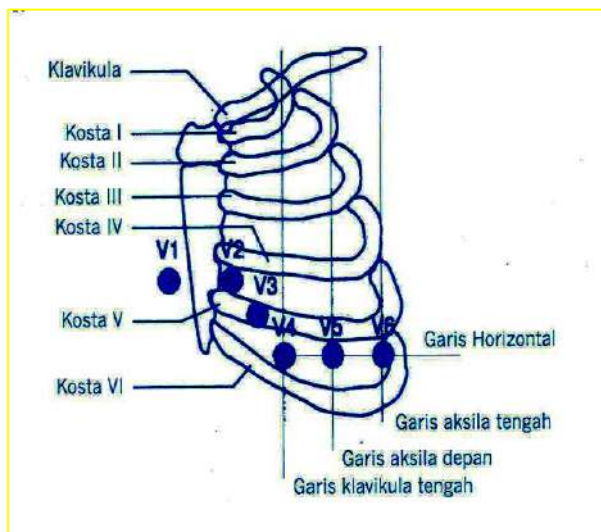
Rekaman listrik yang disadap dari elektrode tangan kiri

c. AVF

Rekaman listrik yang disadap dari elektrode kaki kiri

2) Sandapan Unipolar Prekordial

Merekam besar potensial listrik jantung dengan bantuan elektroda eksplorasi yg ditempatkan di beberapa dinding dada. Elektroda indiferen diperoleh dengan menggabungkan ketiga elektroda ektremitas. **Umumnya V1, V2, V3, V4, V5, V6.**



Gambar 1.12. Sandapan Unipolar Prekordial