

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Listrik

2.1.1 Pengertian

Listrik adalah suatu energi, bahkan energi listrik begitu memegang peranan penting bagi kehidupan kita. Listrik adalah suatu muatan yang terdiri dari muatan positif dan muatan negatif. Arus listrik merupakan muatan listrik yang bergerak dari tempat yang berpotensi tinggi ke tempat berpotensi rendah, melewati suatu penghantar listrik.¹ Media penghantar listrik salah satunya ialah media yang terbuat dari bahan logam, yaitu elektron bebas berpindah dari satu atom ke atom logam berikutnya, sedangkan pada media air elektron dibawa oleh elektrolit yang terkandung dalam media air tersebut.²

Arus listrik terdiri dari dua jenis yaitu arus listrik searah (*direct current* = DC) dan arus listrik bolak-balik (*alternative current* = AC). Arus listrik DC merupakan arus listrik yang mengalir secara terus menerus kesatu arah. Arus DC dipakai dalam industry yang menggunakan proses elektrolisa, misalnya pemurnian dan pelapisan atau penyepuhan logam.¹

Arus listrik AC merupakan arus listrik yang mengalir bolak-balik. Arus AC digunakan di rumah-rumah dan dipabrik – pabrik, biasanya menggunakan voltage 110 volt atau 220 volt. Arus listrik bolak-balik (AC) jauh lebih berbahaya dari pada arus searah (DC).¹

2.1.2 Konduktivitas listrik

Konduktivitas adalah kemampuan dari larutan, logam atau gas, secara singkat semua bahan untuk melewati arus listrik. Kemampuan ini dilakukan oleh kation dan anion, sedangkan dalam logam dilakukan oleh elektron.¹¹

Seberapa baik larutan menghantarkan listrik tergantung pada beberapa faktor yaitu konsentrasi, mobilitas ion, valence ion, dan suhu. Semua zat memiliki beberapa tingkat konduktivitas. Dalam larutan air tingkat kekuatan ion bervariasi dari konduktivitas rendah ultra air murni dengan konduktivitas yang tinggi dari sampel kimia terkonsentrasi.¹¹ Medan listrik diaktifkan maka arus listrik mengalir dalam konduktor karena adanya gerakan partikel bermuatan, oleh karena itu konduktivitas listrik sebanding dengan kepadatan jumlah partikel bermuatan dan mobilitas.¹²

Air laut adalah air yang berasal dari laut atau samudra. Air laut memiliki kadar garam yang terdapat didalam batu-batuan dan tanah antara lain contohnya natrium, kalium, kalsium, dan lain-lain. Kadar garam yang terlarut dalam air tersebut dapat menghantarkan ion-ion listrik.

Air tawar adalah air yang tidak mengandung banyak larutan garam dan larutan mineral didalamnya. Air tawar bisa didapatkan pada air dari sumur, danau, sungai, salju atau es.

Pembawa muatan pada logam jumlahnya adalah tetap (= jumlah elektron bebas) dan ketergantungan suhu konduktivitas listrik hanya datang dari mobilitasnya. Mobilitas elektron bebas dikendalikan oleh hamburan fonon, dan selain itu mobilitas pembawa muatan dalam mineral sering sangat sensitif

terhadap temperatur. Konduktivitas listrik mineral tidak hanya sensitif terhadap suhu, tetapi juga sensitif terhadap parameter yang mengontrol aktifitas ketidakmurnian air dan fugositas oksigen.¹²

Tabel 2. Nilai konduktivitas air⁶

No	Jenis Air	Nilai konduktivitas
1	Air murni	5.5×10^{-6} S/m
2	Air minum	0.005-0.05 S/m
3	Air laut	5 S/m

2.1.3 Satuan-satuan dan hukum-hukum listrik

Rumus atau hukum yang berkaitan dengan biolistrik antara lain: hukum Ohm dan hukum Joule.¹³ Tegangan, arus, dan tahanan termasuk dalam hukum ohm. Hukum ohm adalah persamaan penting untuk listrik.¹⁴

A. Hukum Ohm

Perbedaan potensial antara ujung konduktor berbanding langsung dengan arus yang melewati dan berbanding terbalik dengan tahanan dari konduktor.

Hukum Ohm ini dapat dinyatakan dalam rumus :¹³

$$R = \frac{V}{I}$$

R = dalam Ohm (Ω)

I = amper (A)

V = tegangan (Volt)

Tegangan menentukan aliran arus semakin besar tegangan (V) semakin besar arus (I), sedangkan jika resistensi (R) meningkat arus akan menurun. Penurunan daya tahan (R), akan menyebabkan peningkatan arus (I). Hubungan dari ketiga unsur hukum ohm yaitu arus, tegangan dan resistensi, secara matematis harus saling menyeimbangkan.¹⁴

B. Hukum Joule

Arus listrik yang melewati konduktor dengan perbedaan tegangan (V) dalam waktu tertentu akan menimbulkan panas.¹³

$$H_1 (\text{kalori}) = \frac{VIT}{J}$$

V = tegangan dalam voltage.

I = arus dalam Amper.

T = waktu dalam detik

J = joule = 0,239 Kal.

2.2 Jantung

2.2.1 Pengertian

Fungsi jantung adalah memompa darah ke seluruh tubuh dan menampungnya kembali setelah dibersihkan oleh organ paru-paru. Fungsi jantung adalah sebagai organ pemompa darah pada manusia, pada saat itu jantung menyediakan darah yang telah terkandung oksigen yang cukup dan dialirkan ke seluruh tubuh, serta membersihkan tubuh dari hasil metabolisme (karbondioksida). Jantung mengumpulkan darah yang terisi karbondioksida dari seluruh tubuh dan selanjutnya dipompa ke paru-paru, dengan cara darah pada jantung mengambil oksigen dan membuang karbondioksida. Jantung darah yang

hanya akan oksigen yang berasal dari paru-paru dipompa ke jaringan seluruh tubuh manusia.

2.2.2 Anatomi jantung

Jantung merupakan organ muskularis yang mempunyai rongga didalamnya dan berbentuk kerucut (*conus*) dengan ukuran sebesar kepala / tinju pemiliknya. Jantung bersandar pada diafragma diantara bagian bawah kedua paru-paru. Dibungkus oleh membran khusus yang disebut perikardium. Apex dari kerucut terletak dibawah, depan dan kekiri. Hampir 2/3 jantung terletak disebelah kiri bidang media.¹⁵

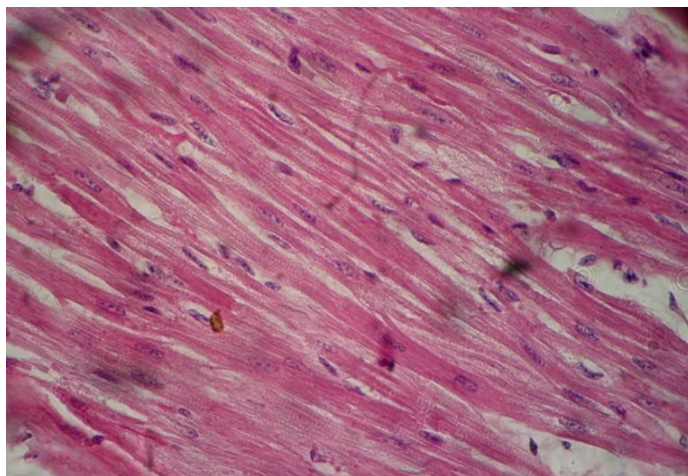
Jantung terletak didalam mediastinum media, disebelah ventral ditutupi oleh sternum dan cartilage costa III-VI. Dinding jantung terdiri dari tiga lapis dari yang terluar sampai yang terdalam yaitu epikardium, miokardium, dan endokardium. Bagian-bagian jantung memiliki empat ruang yaitu dua buah atrium kiri dan kanan, dua buah ventrikel kiri dan kanan. Diantara kedua atrium dan ventrikel kiri dan kanan dipisahkan oleh septum sehingga jantung terpisah menjadi dua kanan dan kiri. Jantung bagian kanan didalam tubuh letaknya lebih kearah ventral dan yang sisi kiri lebih ke arah dorsal (posterior).¹⁵

2.2.3 Histologi jantung

Jantung terdiri dari tiga tipe otot jantung (miokardium) yang tersusun atas fibra yang berjalan transversal dan longitudinal dan saling menjalis yaitu otot atrium, otot ventrikel, dan serat otot khusus penghantar dan pencetus rangsang yakni *atrioventricularis bundle* (bundle his).¹⁵ Otot atrium dan ventrikel

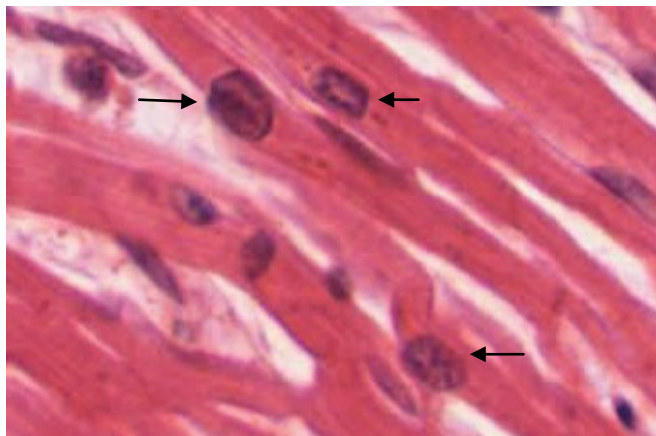
berkontraksi dengan cara yang sama seperti otot rangka. Serat – serat otot khusus penghantar dan pencetus rangsangan berkontraksi dengan lemah sekali karena hanya mengandung sedikit serat kontraktif, bahkan serat-serat ini menghambat irama dan berbagai kecepatan konduksi. Serat-serat ini bekerja sebagai sistem pecetus rangsangan bagi jantung.¹⁶

Serat otot jantung memiliki beberapa ciri yang juga terlihat pada otot rangka. Perbedaannya adalah otot-otot jantung terdiri atas sel-sel yang panjang, terdapat garis-garis melintang di dalamnya, bercabang tunggal, terletak paralel satu sama lain, dan memiliki satu atau dua inti yang terletak di tengah sel. Juga terlihat myofibril jantung pada potongan melintang. Satu ciri khas untuk membedakan otot jantung adalah diskus interkalatus. Diskus ini adalah struktur berupa garis-garis gelap melintang yang melintasi rantairantai otot, yang terpulas gelap, ditemukan pada interval tak teratur pada otot jantung, dan merupakan kompleks tautan khusus antar serat-serat otot yang berdekatan.¹⁷



Gambar 1. Histologi normal jantung¹⁸

Fineschi V,dkk (2006) melakukan pemeriksaan hitopatologi otot jantung terhadap 16 korban sengatan listrik dan melaporkan bahwa terjadi perubahan serat otot jantung berupa teregang dan atau terputusnya diskus interkalatus dan terputusnya miofibril (*myofibril break up*(MFB)) pada kasus tersebut. MFB adalah sebagai berkas sel miokard yang hiperdistensi diselingi dengan sel miokard yang hiperkontraksi. Inti sel pada miokardium yang hiperkontarksi memiliki bentuk “persegi” dibanding pada sel yang terdistensi. Pada kelompok sel yang lain ditemukan juga adanya pelebaran atau ruptur (segmentasi) diskus interkalatus. Gambaran MFB menggambarkan terjadinya kerusakan dan ketidaksinkronan listrik jantung dan dapat diinduksi oleh aliran sengatan listrik.¹⁹



Gambar 2. Inti sel yang berbentuk persegi¹⁹

2.2.4 Kelistrikan jantung

Jantung merupakan sebuah organ unik yang mampu memproduksi muatan listrik. Hal ini telah dibuktikan oleh von Kolliker (1855) melalui preparat yang dikenal sebagai *rheoscopic frog*, yaitu bila saraf dari otot *gastrocnemius* kodok

ditelentangkan pada permukaan jantung yang sedang berdenyut, maka otot tersebut ini akan ikut berkontraksi sesuai dengan irama denyut jantung.²⁰

Jantung dibentuk oleh tiga jenis sel eksitasi, yaitu:

- Sel-sel *pacemaker* sebagai sumber bioelectric jantung. Pada keadaan normal sel pacemaker dominan berada di nodus SA (*Sino-Atrial node*).²⁰
- Sel-sel konduksi (jaringan neuromuskular yang membentuk traktus intermodal atrium, berkas His atau serat Purkinje) sebagai kawat penghantar arus bioelektrik.²⁰
- Sel-sel otot jantung (miokardium) yang berfungsi untuk kontraksi.²⁰

Seperti sel-sel eksitasi lainnya, maka pada membran sel-sel otot jantung terdapat beribu-ribu kanal ion yang merupakan jalan utama bagi ion-ion untuk berdifusi. Kanal-kanal tersebut bersifat relative spesifik terhadap ion-ion tertentu, misalnya kanal kalsium terutama dilewati Ca^{++} , kanal kalium terutama akan dilalui K^+ , kanal natrium terutama dilalui Na^+ , dan seterusnya. Kanal-kanal ion tersebut dikontrol oleh suatu mekanisme ‘pintu gerbang’ sehingga dapat membuka dan menutup tergantung pada kondisi transmembran. Terbentuknya kanal tersebut akan mengakibatkan ion mengalir melewati membran menurut konsentrasi gradiennya (*concentration gradients*), yaitu dari sisi konsentrasi tinggi ke sisi konsentrasi rendah.²⁰

Tingkat permeabilitas membran sel jantung terhadap berbagai elektrolit juga berbeda ketika sel tidak aktif. Membran sel jantung sangat permeable

terhadap K^+ dan Cl^- , sedikit permeable terhadap Na^+ dan tidak permeable terhadap anion organik.²⁰

Membran sel dapat mempertahankan gradient tertentu agar ion-ion dapat *continue* berdifusi melalui kanal ion, yaitu suatu *carrier transport system* (Na^+ , K^+ , ATP-ase) yang dikenal sebagai pompa sodium (*sodium pump*), yang berfungsi memompa Na^+ keluar dan K^+ masuk ke dalam sel. Keadaan sel yang tidak aktif terjadi distribusi yang tidak seimbang dari ion-ion dimana Na^+ dan Cl^- lebih banyak berkumpul di luar sedangkan K^+ dan anion organik lebih banyak berkumpul didalam membran sel.²⁰

Ion-ion yang sejenis cenderung membentuk persamaan elektron di dalam dan di luar sel, maka distribusi yang tidak seimbang ini menimbulkan suatu gaya tarik-menarik antara ion-ion dimana ion negatif (terutama anion organik) berkumpul di permukaan dalam, sedangkan ion positif (terutama Na^+) berkumpul di permukaan luar membran sel. Keadaan ini dikatakan sel berada dalam stadium polarisasi. Ion-ion yang memiliki muatan listrik, sehingga pada waktu sel tidak aktif, terdapat perbedaan potensial (*resting membrane potensial*) antara permukaan dalam dan luar membran sel sebesar kira-kira 95 mV, dimana muatan intraseluler lebih negatif dibandingkan muatan ekstraseluler sehingga ditulis -95 mV.²⁰

Sel-sel otot jantung dirangsang oleh listrik, tekanan, suhu panas, K^+ atau obat-obat yang menghambat aktivitas pompa sodium, muatan negatif dipermukaan dalam membran sel-sel jantung dapat berkurang (menuju ke nilai

yang lebih positif). Perubahan potensial membran dari nilai negatif menuju ke arah yang lebih positif disebut proses depolarisasi.²⁰

Membran mengadakan depolarisasi dari -95mV mencapai *threshold* (nilai ambang potensial) untuk sel otot jantung yaitu -70mV , maka perubahan voltase ini akan menjadi *trigger* untuk membuka kanal ion Na^+ secara mendadak, sehingga terjadilah pengaliran Na^+ yang sekonyong-sekonyong masuk ke dalam sel. Perpindahan muatan positif yang tiba-tiba masuk dari luar ke dalam sel mengakibatkan potensial membran secara mendadak pula berubah dari nilai negatif menjadi positif. Bagian dari proses depolarisasi ini dinamakan aksi potensial. Membran sel akan mengalami proses repolarisasi yaitu suatu proses redistribusi ion-ion kembali ke stadium istirahat, setelah fase depolarisasi berlalu.²⁰

Jantung memiliki sistem untuk membangkitkan sendiri impuls ritmis yang menimbulkan kontraksi ritmis otot jantung untuk kemudian mengkonduksikan impuls ini ke seluruh jantung. Sistem konduksi jantung terdiri atas:

1. Nodus Sinus (Nodus Sinoatrial atau Nodus S-A)

Nodus sinus adalah kepingan otot khusus yang terletak di dalam dinding lateral superior dari atrium kanan tepat di sebelah bawah sedikit lateral dari lubang vena kava superior, tidak memiliki filament kontraktil, serat lebih kecil daripada serta otot atrium dan serat sinus berhubungan langsung dengan serat atrium sehingga potensial aksi dalam nodus sinus akan segera menyebar ke dalam atrium.¹⁶

2. Jalur Internodus

Ujung-ujung serat nodus sinus bersatu dengan serat otot atrium sekitarnya sehingga potensial aksi akhirnya menyebar ke seluruh otot atrium dan sampai pada nodus atrioventrikuler. Terdapat tiga macam jalur internodus yaitu jalur internodus anterior, media, dan posterior.¹⁶

3. Nodus Atrioventrikular (Nodus A-V)

Nodus A-V memperlambat aliran impuls dari atrium ke ventrikel jantung untuk memberikan waktu bagi atrium guna mengosongkan isinya ke dalam ventrikel.¹⁶

4. Berkas Atrioventrikular (Berkas A-V)

Karakteristiknya adalah potensial aksi selalu berjalan dari atrium ke ventrikel, tidak boleh sebaliknya, kecuali pada keadaan patologis.¹⁶

Berkas serat purkinje kiri dan kanan yang berjalan dari nodus A-V melalui berkas A-V dan menyebar ke seluruh ventrikel. Mempunyai kemampuan penghantaran impuls yang sangat cepat hingga menyebar ke seluruh permukaan endokardium.¹⁶

2.3 Trauma sengatan listrik

Trauma listrik adalah trauma yang relatif jarang terjadi tetapi berpotensi merugikan bentuk cedera multisistem dengan morbiditas yang tinggi dan kematian. Cedera listrik melibatkan mekanisme langsung dan tidak langsung. Kerusakan mekanisme langsung disebabkan oleh efek actual yang arus listriknya mengenai berbagai tubuh jaringan (misalnya miokardium) atau oleh konveksi

listrik menjadi energi termal yang bertanggung jawab untuk berbagai jenis luka bakar. Cedera langsung cenderung memiliki hasil dari kontraksi otot yang parah disebabkan oleh cedera listrik, dengan demikian paparan arus listrik bagian tubuh yang berbeda untuk tegangan yang sama akan menghasilkan arus yang berbeda yang dikarenakan resistensi bervariasi secara signifikan antara berbagai jaringan.²¹

2.3.1 Mekanisme trauma sengatan listrik

Mekanisme kematian dikarenakan arus listrik bias disebabkan oleh beberapa mekanisme yaitu fibrilasi ventrikel, paralisis pernapasan, dan paralisis pusat pernapasan.

- Fibrilasi ventrikel yaitu yang paling berbahaya bila arus listrik berjalan dari lengan kiri ke lengan satunya, aliran listrik yang demikian tingkat kematian adalah sekitar 60%.²²
- Paralisi pernapasan yaitu dapat terjadi bila aliran arus diatas “*let go*” tres hold, akan tetap dibawah kebutuhan yang dapat menimbulkan fibrilasi ventrikel.²²
- Paralisis pusat pernapasan atau kelumpuhan pada pusat pernapasan dapat terjadi bila arus listrik melewati otak dan paralisis ini akan menetap setelah arus listrik tersebut melemah atau menghilang. Jantung akan tetap berdenyut, sedangkan pernapasan artifisial yang dilakukan dalam waktu yang cukup lama (sampai beberapa jam) dapat menolong jiwa korban.²²

2.3.2 Faktor-faktor mempengaruhi sengatan listrik

Faktor-faktor yang mempengaruhi cedera listrik :

- Besarnya tegangan (*voltase*)

Tegangan adalah ukuran dari perbedaan potensial listrik antara dua titik dan ditentukan oleh sumber listrik. Cedera listrik yang konvensional dibagi menjadi tegangan tinggi atau rendah menggunakan 500 atau 1000 V sebagai yang paling umum garis pemisah. Tegangan tinggi dan rendah dapat menyebabkan morbiditas yang signifikan dan kematian. Tidak ada kematian dicatat dari kontak dengan tegangan rendah yang terkait dengan panjang garis komunikasi jarak (24V) atau saluran telpon (65V). Kematian bagaimanapun, dilaporkan dengan paparan 110V saat ini rumah tangga, terutama dalam khusus keadaan lingkungan seperti *electrocutions* yang berhubungan dengan *bathtub*.²

- Kuatnya arus (*ampere*)

Kuat arus dinyatakan dalam ampere, adalah ukuran dari jumlah energi yang mengalir melalui objek.² Kuat arus yang dapat mematikan 100A.²²

- Besarnya tahanan (*resistensi*)

Resistensi adalah kecenderungan suatu material untuk menahan aliran arus listrik, melainkan spesifik untuk suatu jaringan tertentu, tergantung pada kadar air, suhu, dan sifat fisik lainnya. Tingginya ketahanan suatu jaringan ke aliran saat ini,

semakin besar potensi untuk transformasi energi listrik termal energi pada setiap saat tertentu. Saraf, dirancang untuk membawa sinyal-sinyal listrik, dan otot dan pembuluh darah, karena elektrolit yang tinggi dan kadar air, memiliki resistansi rendah dan konduktor yang baik. Tulang, tendon, dan lemak yang semua berisi sejumlah matriks inert, memiliki ketahanan yang sangat tinggi. Sedangkan jaringan lain dari tubuh adalah sedang dalam resistensi.²

- Lamanya kontak

Semakin lama kontak, maka akan semakin besar arus listrik yang memasuki jaringan tubuh, sesuai hukum Joule.^{23,24,25}

- Luasnya daerah terkena kontak

Semakin luas area kontak maka semakin sedikit kerusakan pada permukaan tubuh. Hal ini sesuai dengan hukum joule.^{23,24,25}

Syok listrik selain dipengaruhi oleh kuat arus listrik, tegangan listrik dan tahanan tubuh juga dipengaruhi oleh

1. Jenis kelamin

Penelitian tentang nilai ambang persepsi (arus minimum yang dapat dideteksi) dan *let go current* (yang dapat menyebabkan tarikan tangan kembali) yang dilakukan oleh Dalziel pada tahun 1973 menyatakan bahwa:

- a. Rata-rata *threshold of perception* untuk laki-laki 1,1 mA, untuk wanita 0,7 mA. Minimum nilai ambang persepsi : 500 μ A.

- b. Rata-rata *let go current* untuk laki-laki : 16 mA, untuk wanita 10,5 mA. Minimum nilai *let go current* laki-laki : 9,5 mA, wanita 6 mA.¹³

2. Frekuensi AC

Frekuensi 50-60 Hz merupakan minimal *let go current*. Di bawah 10 Hz *let go current* akan meningkatkan dan otot-otot akan terjadi relaksasi sebagian dan diatas beberapa ratus Hz *let go current* akan meningkat pula dan otot-otot mengalami strength duration trade off serta refrakter jaringan yang telah mengalami eksitasi.¹³

3. Berat badan

Penelitian pada binatang oleh Ferris (1963), Kiselev 1963 menyatakan bahwa nilai ambang fibrilasi akan meningkat dengan meningkatnya berat badan. Diramalkan berlaku pula pada manusia.¹³

2.3.3 Kerusakan jantung akibat sengatan listrik

Cedera listrik dapat mengenai jantung dengan dua cara yaitu dengan menyebabkan nekrosis langsung dari miokardium dan dengan menyebabkan detak jantung tak beraturan. Tingkat miokard yang terkena cedera tergantung pada tegangan dan jenis arus, menjadi lebih luas dengan tegangan yang lebih tinggi. Cedera mungkin fokal atau difus dan umumnya terdiri dari luas, diskret, tambal sulam pita kontraksi nekrosis yang melibatkan miokardium, jaringan nodus, jalur konduksi, dan arteri koroner.²¹

Gangguan irama jantung dapat dipengaruhi dengan paparan arus relative rendah. Paparan arus listrik tegangan tinggi dengan melalui tangan ke tangan atau transmisi tangan ke kaki dapat menyebabkan fibrilasi ventrikel.²¹

Disritmia jantung dilaporkan banyak terjadi pada penderita cedera listrik, namun patogenesisnya tidak jelas, kemungkinan besar multifaktorial. Mekanisme yang mungkin termasuk *focus arrhythmogenic* karena disebabkan nekrosis miokard, perubahan dalam konsentrasi Na^+ - K^+ - *Adenosine triphosphatase*, dan perubahan permeabilitas membran miosit. Disritmia terlambat mungkin karena *focus arrhythmogenic* sekunder *patchy* nekrosis miokard dan terutama karena cedera dari *SA node*.²¹

Cedera listrik dapat menyebabkan efek langsung dan tidak langsung di dasar vascular, yang dikarenakan kadar air yang tinggi, adalah konduktor yang sangat baik. Efek dari arus listrik bervariasi antara berbagai ukuran pembuluh darah. Arteri besar tidak terlalu terpengaruh karena aliran yang cepat memungkinkan untuk menghilangkan panas yang dihasilkan oleh arus listrik. Arteri besar rentan terhadap nekrosis medial, dengan pembentukan aneurisma dan pecah. Pembuluh darah yang lebih kecil akan terpengaruh karena nekrosis koagulasi dan cenderung terpengaruh terutama sebagai akibat dari cedera tegangan tinggi.²¹

Manifestasi klinis yang terjadi dapat merupakan henti jantung dan fibrilasi ventrikel, komplikasi yang serius dari jantung yang disebabkan oleh cedera listrik dan selalu fatal kecuali resusitasi segera dapat dilakukan berbagai upaya, namun ada juga beberapa disritmia lainnya yang memiliki prognosis yang jauh lebih baik.

Sinus takikardia dan perubahan tidak spesifik pada gelombang ST dan perubahan *twave*. Defek konduksi, seperti sebagai berbagai tingkat blok jantung, *bundle-block brunch*, dan perpanjangan interval QT, merupakan disritmia lainnya yang memiliki prognosis baik.²¹