



**PERBEDAAN KERUSAKAN OTOT EKSTREMITAS
TIKUS *WISTAR* AKIBAT PAPARAN ARUS LISTRIK
SECARA LANGSUNG DAN MELALUI MEDIA AIR**

LAPORAN AKHIR PENELITIAN KARYA TULIS ILMIAH

Diajukan untuk memenuhi tugas dan
melengkapi syarat dalam menempuh
Program Pendidikan Sarjana Kedokteran

DISUSUN OLEH:

LIDAWATI NILANDARI

NIM: G2A005116

**FAKULTAS KEDOKTERAN
UNIVERSITAS DIPONEGORO**

SEMARANG

2009

HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENELITIAN KARYA TULIS ILMIAH

**Perbedaan Kerusakan Otot Ekstremitas Tikus *Wistar* Akibat Paparan Arus Listrik
Secara Langsung dan Melalui Media Air**

Disusun Oleh:

LIDAWATI NILANDARI

G2A 005 116

Telah diuji di hadapan Tim Penyaji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro Semarang pada tanggal 19 Agustus 2009 dan telah diperbaiki sesuai dengan saran-saran yang diberikan.

Semarang, 24 Agustus 2009

Penguji,

Ketua Penguji,

dr. Udadi Sadhana, Mkes, Sp.PA

dr. Ika Pawitra Miranti, M.Kes, SpPA

NIP.131967650

NIP. 131 875 465

Pembimbing,

dr. Gatot Suharto SpF. Mkes SH

NIP. 131610341

DAFTAR ISI

Halaman Judul	.....	i
Halaman Pengesahan	.....	ii
Daftar Isi	.....	iii
Daftar Gambar	.....	vi
Daftar Tabel	.....	vii
Abstrak	.....	viii
BAB 1 PENDAHULUAN	.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	.....	1
1.2 Perumusan Masalah	.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	.....	2
1.4 Manfaat Penelitian	.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	.....	4
2.1 LISTRIK	.....	4
2.1.1 Definisi Listrik	.....	4
2.1.2 Hukum Dalam Biolistrik	.....	6
2.1.3 Listrik Tubuh	.....	7
2.1.3.1 Kelistrikan Sel	.....	7
2.1.3.2 Perambatan Potensial Aksi	.....	9
2.2 HISTOLOGI DAN FISILOGI OTOT RANGKA	.....	10

2.2.3	Histologi Otot Skelet	10
2.2.4		M
	Mekanisme Kontraksi dan Relaksasi	13
2.3	TRAUMA SENGATAN LISTRIK	14
2.3.3	Mekanisme Terjadinya Jejas Akibat Sengatan Listrik	19
2.3.4	Kerusakan Otot Rangka Akibat Trauma Sengatan Listrik	21
2.3.5	Gambaran Kerusakan Jaringan Pada Otot Rangka Akibat Trauma Sengatan Listrik	22
2.4	KERANGKA TEORI	25
2.5	KERANGKA KONSEP	26
2.6	HIPOTESIS PENELITIAN	27
BAB III METODE PENELITIAN		28
3.1	Ruang Lingkup Penelitian	28
3.2	Rancangan Penelitian	28
3.3	Populasi dan Sampel	29
3.3.1	Populasi	29
3.3.2	Sampel	29
3.3.2.1	Kriteria Inklusi dan Eksklusi	29
3.3.2.2	Jumlah Sampel	29
3.3.2.3	Cara Pengambilan Sampel	30
3.4	Variabel Penelitian	30
3.5	Alat dan Bahan	31

3.6	Cara Pengumpulan data	.....	32
3.7	Data yang Dikumpulkan	.....	33
3.8	Definisi Operasional	.....	33
3.9	Alur Kerja	.....	34
3.10	Pengolahan dan Analisa Data	.....	34
BAB 4 HASIL PENELITIAN			.....35
BAB 5 PEMBAHASAN			.....39
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN			.....45
Daftar Pustaka			.....46
LAMPIRAN			

DAFTAR LAMPIRAN

Analisa statistik

Surat Ijin

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Histologi otot rangka	12
Gambar 2. Box plot.....	36
Gambar 3. Preparat perlakuan sengatan listrik secara kontak langsung	38
Gambar 4. Preparat perlakuan sengatan listrik di air	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai deskriptif	35
Tabel 2. Uji normalitas.....	35
Tabel 3. Uji <i>independent t-test</i>	37
Tabel 4. Kriteria penilaian derajat struktur histopatologi otot ekstremitas	40

ABSTRAK

PERBEDAAN KERUSAKAN OTOT EKSTREMITAS TIKUS *WISTAR* AKIBAT PAPAN ARUS LISTRIK SECARA LANGSUNG DAN MELALUI MEDIA AIR

Lidawati Nilandari*, Gatot Suharto**

Latar Belakang: Kematian karena aliran listrik dalam air tidak selalu menunjukkan fenomena spesifik. Dalam studi kasus kematian, hanya sekitar 55% yang menunjukkan tanda tersebut, oleh sebab itu diagnosa kematian akibat sengatan listrik merupakan hasil kerjasama antara patologi forensik, toksikologi forensik, dan polisi penyidik.¹ Penelitian ini diharapkan memberikan pengaruh yang bermakna untuk kepentingan medikolegal sehingga meminimalkan diagnosa yang tidak tepat tentang kematian akibat trauma arus listrik.

Tujuan: Mengetahui perbedaan antara kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik secara langsung dan melalui media air.

Metode: Penelitian eksperimental ini dengan rancangan *post test only group design*. Sampel 10 ekor tikus dibagi dalam 2 kelompok. Tiap kelompok terdiri dari 5 ekor tikus wistar. Pada kelompok P1 diberi arus listrik secara kontak langsung sebesar 220 volt dan kuat arus 100mA dengan lama paparan 10 detik. Pada kelompok P2 arus listrik dilewatkan melalui air dengan besar tegangan 220 volt dan kuat arus 100mA dengan lama paparan 10 detik Otot ekstremitas diambil dan kemudian dilakukan pengecatan Hematoksin Eosin. Data yang dilaporkan berupa jumlah daerah yang mengalami kerusakan otot derajat 0,5.

Hasil: uji *independent t-test* didapatkan hasil adanya perbedaan yang bermakna antara kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik secara langsung dan melalui media air ($p=0,005$).

Kesimpulan: Terdapat perbedaan antara kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik secara langsung dan melalui media air.

Kata kunci: Kontak listrik secara langsung, kontak listrik melalui air, kerusakan otot tikus *Wistar*

*Mahasiswa Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro semester 8

***Staf Pengajar bagian Forensik Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro*

ABSTRACT

The Differences of Extremity Muscle Damage at Wistar rat Resulted by Exposure of Direct and Water Conducted Electrical Current

*Lidawati Nilandari**, *Gatot Suharto***

Background: *Death by electrocution in the water is not always show specific phenomenon. In the study of death, only about 55% show spesific sign. The diagnosis of death by electrocution needs cooperation of forensic pathology, toxicology forensic, and investigating officer. We hope this research give significant influence to medicolegal aspect to minimize the confusion diagnostic about death by electrocution..*

Purpose: *To define the differences of extremity musle damage between Wistar rat resulted by exposure of direct and water conducted electrical current.*

Method: *This research used the post test only group design. Ten Wistar rats were divided into two groups. Each groups contains of five Wistar rats. At P1 group the rats direcctly contact with 220volts, 100mA, 10seconds of electrical current. At P2 the rats contact with 220volts, 100mA, 10seconds of electrical current conducted by water. The extremity muscles were taken and stained using Hematoxylin Eosin. Reported data is the total area that experience grade 0,5 of muscle damage*

Results: *The result of independent t-test showed a significant difference of the number of muscle damage at Wistar rat resulted by exposure of direct and water conducted electrical current($p=0,005$).*

Conclusion: *There is difference of extremity muscle damage at Wistar rats resulted by exposure of direct and water conducted electrical current.*

Keyword: *direct electrical current, water conducted electrical current, extremity muscle damage of Wistar rat.*

* *8th Semester Medical Faculty Student of Diponegoro University*

** *Department of Forensic Medical Faculty of Diponegoro University*

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Kematian akibat sengatan listrik dalam air tidak selalu menunjukkan fenomena spesifik yaitu garis batas di kulit setinggi air (*electrical marks*) yang terbentuk pada saat arus melewati konduktor logam menuju tubuh dan elektrolisis muncul sehingga melekatkan permukaan logam di kulit bahkan di jaringan subkutan. Dalam studi kasus kematian, hanya sekitar 55% yang menunjukkan tanda tersebut, oleh sebab itu diagnosa kematian akibat sengatan listrik merupakan hasil kerjasama antara patologi forensik, toksikologi forensik, dan polisi penyidik.^{1,2}

Penelitian ini menggunakan dua perlakuan berbeda dikarenakan perbedaan sifat konduktivitasnya. Pada konduktor logam arus listrik berkaitan dengan aliran elektron sepanjang konduktor (konduksi elektronik). Sementara pada air konduktivitas berhubungan dengan sejumlah mineral atau konsentrasi ionik (konduksi elektrolit) yang besarnya dipengaruhi oleh pertukaran anion, salinitas, keasaman (pH), konduktivitas, dll.³

Umumnya otot ekstremitas secara langsung terkena dampak sengatan listrik, dan trauma listrik pada jaringan ini memiliki gambaran histopatologi yang spesifik dimulai dengan proliferasi sarkolema sebagai gambaran kerusakan tingkat awal sampai terjadinya nekrosis otot yang difus dan luas.⁴ Oleh sebab itu, gambaran kerusakan otot ekstremitas akibat paparan arus listrik penting dalam membantu diagnosis trauma sengatan listrik.

Penggunaan arus bolak balik pada penelitian ini adalah karena arus ini lebih sering menjadi penyebab kematian dan manusia lebih sensitif sekitar 4-6 kali terhadap arus bolak balik daripada arus searah. Sedangkan jumlah arus 100mA pada penelitian ini berdasarkan pada literatur bahwa 100mA dapat menyebabkan fibrilasi ventrikel dan bahkan kematian. Faktor – faktor yang berperan didalam luka akibat arus listrik yaitu: intensitas, tegangan, tahanan, arah aliran, dan waktu.^{1,5,6}

Mengingat penelitian ini tidak dapat dilakukan pada manusia, maka penelitian ini dilakukan pada hewan coba tikus *Wistar*. Hal tersebut dikarenakan tikus *Wistar* memiliki karakteristik yang mirip dengan manusia dalam fisiologi dan respon endokrin sehingga sering digunakan dalam eksperimen biologi sebagai organisme model.⁷

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Apakah terdapat perbedaan kerusakan otot ekstremitas akibat paparan arus listrik bolak-balik secara langsung dan melalui media air?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

1.3.1 Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan antara kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik bolak-balik secara langsung dan melalui media air.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menilai kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* pada kelompok yang diberi kuat arus listrik 100 mA secara langsung.

2. Menilai kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* pada kelompok yang diberi kuat arus listrik 100 mA dengan melalui media air.
3. Membandingkan gambaran kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* yang diberi paparan arus listrik bolak-balik secara langsung dan melalui media air.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan informasi bagi:

1. Peneliti lain mengenai perbedaan kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik secara langsung dan melalui media air.
2. Sebagai tambahan informasi untuk penelitian selanjutnya sehubungan dengan tanda spesifik atau tidaknya kematian akibat arus listrik dalam ruang lingkup kedokteran forensik.
3. Sebagai tambahan informasi bagi identifikasi korban trauma sengatan listrik dalam lingkup kedokteran forensik di Indonesia.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 LISTRIK

2.1.1 Definisi Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju muatan aliran yang melalui suatu penampang tertentu. Dapat pula diartikan sebagai banyaknya muatan yang melintasi suatu permukaan dalam satu satuan waktu tertentu. Arus listrik timbul karena muatan listrik mengalir dari saluran positif ke saluran negatif. Sedangkan elektron adalah partikel terluar dari atom yang bermuatan negatif yang bila bersentuhan dengan obyek, obyek tersebut akan ikut bermuatan negatif.⁸

Pada konduktor logam arus listrik berkaitan dengan aliran elektron sepanjang konduktor, inilah yang kemudian disebut konduksi elektronik. Pada semua konduktor dan semikonduktor logam hanya terdapat konduksi elektronik, dan konduktivitas listriknya sangat bergantung pada jumlah elektron yang tersedia dalam proses konduksi.

Sementara pada media air konduktivitas berhubungan dengan sejumlah mineral atau konsentrasi ionik. Pada media air, ionlah yang membawa arus listrik, sebab elektron saja tidak bisa melewati air, paparan arus listrik melalui air ini kemudian dikenal dengan istilah konduksi elektrolit yang besarnya dipengaruhi oleh pertukaran anion, keasaman (pH), dll.³

Air murni tidak dikategorikan sebagai konduktor listrik yang baik. Air yang didestilasi dengan keseimbangan karbondioksida di udara memiliki konduktivitas sekitar $10 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (20 dS/m) (20dS/m). Karena arus listrik pada air diangkut oleh ion pada larutan, konduktivitas meningkat sesuai dengan peningkatan konsentrasi ion.^{9,10}

Jenis-jenis konduktivitas air⁹:

1. air murni $5.5 \cdot 10^{-6} \text{ S/m}$
2. air minum $0.005 - 0.05 \text{ S/m}$
3. air laut 5 S/m

Konduktivitas air tergantung pada salinitas, dalam hal ini terutama berhubungan dengan kadar ion Na^+ dan Cl^- sebagai ion pengangkut elektron. Semakin tinggi kadar garam suatu larutan, maka konduktivitasnya semakin meningkat.. Air yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan aqudest dengan kadar salinitas mendekati nol. Hal ini dilakukan sebagai patokan bagi penelitian-penelitian lain mengenai sengatan listrik di air. Selain itu, dari berbagai literatur disebutkan bahwa walaupun kadar ion Na^+ dan Cl^- dalam suatu larutan nilainya mendekati nol, keberadaan ion H^+ dan OH^- sebagai komponen air tetap mempengaruhi konduktivitas larutan.

Konduktivitas air juga tergantung pada temperatur air, artinya semakin rendah temperatur air maka perubahan konduktivitas air semakin meningkat. Selain itu dengan meningkatnya temperatur air daya hambat (resistansi) air akan menurun. Hal ini dipengaruhi oleh ion Hidrogen (H^+) dan ion Hydroxide (OH^-)

Peningkatan suhu akan mengakibatkan hambatan mobilitas ion-ion tersebut. Dari penelitian ditemukan bahwa setiap kenaikan suhu 1°C, maka akan terjadi penurunan hantaran listrik kurang lebih 2% (dengan batas rentang 1% - 3%).¹⁰

2.1.2 Hukum Dalam Biolistrik^{6,11}

Ada beberapa hukum yang berkaitan dengan efek listrik dalam tubuh, yaitu:

1. Hukum **OHM**: ” *perbedaan potensial antara ujung konduktor berbanding langsung dengan arus yang melewati dan berbanding terbalik dengan tahanan konduktor*”

$$V = I.R$$

R: tahanan (Ω)

I: kuat arus (A)

V: tegangan (Volt)

Berdasarkan Hukum Ohm tersebut maka peningkatan jumlah arus listrik yg melewati jaringan tubuh dapat terjadi jika tegangan listrik meningkat dan atau tahanan jaringan tubuh menurun. Sehingga kerusakan jaringan yang ditimbulkan semakin besar.

2. Hukum **Joule**: ” *arus listrik yang melewati konduktor dengan perbedaan tegangan dalam waktu tertentu akan menimbulkan panas*”

$$E = V.I.t$$

E: energi (Joule)

I : kuat arus (A)

V: tegangan (Volt)

t : waktu (detik)

Atau dapat pula dirumuskan dalam bentuk:

$$H(\text{kalori}) = V.I.T / J$$

H : energi panas (kalori); J : Joule = 0,239 kalori.¹¹

2.1.3 Listrik Tubuh

2.1.3.1 Kelistrikan Sel

Sel saraf dirancang sebagai pembawa sinyal elektrik. Otot dan pembuluh darah memiliki sifat sebagai konduktor karena memiliki kandungan elektrolit yang tinggi serta kandungan air. Tulang, tendo, dan lemak karena memiliki kandungan matriks yang *inert* maka disebut sebagai jaringan dengan resistensi listrik yang tinggi.⁶

Sel mempunyai lapisan yang disebut membran sel, membrane sel dalam system kelistrikan berfungsi sebagai kapasitor listrik¹² di dalam sel ini terdapat ion Na⁺, K⁺, Cl⁻ dan protein. Sel mempunyai kemampuan memindahkan ion dari satu sisi ke sisi yang lain yang disebut aktifitas kelistrikan sel.⁶ Karena gradient konsentrasi kalium dari dalam sel ke luar sel besar maka Ion K⁺ akan melakukan difusi dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah sehingga membentuk keadaan elektropositif diluar membran dan elektronegatif di dalam membran akibat anion-anion negatif yang tetap tertinggal dan tidak berdifusi keluar menyertai kalium.¹² Pada saat tertentu akan terjadi membran dipole/membran dua kutub di mana larutan dengan konsentrasi yang tadinya rendah akan kelebihan ion positif, berlawanan dengan larutan yang konsentrasi tinggi akan berubah menjadi kekurangan ion sehingga menjadi lebih negatif. Membran permeabel

biasanya permeabel terhadap ion Na^+ , K^+ , dan Cl^- sedangkan terhadap protein besar sangat tidak permeabel.¹¹

Dalam keadaan biasa (pada keadaan istirahat) ion Na^+ lebih besar di luar sel daripada di dalam sel sehingga di dalam sel akan lebih negatif dibandingkan dengan di luar sel. Pada keadaan demikian disebut potensial membran negatif. Jika sebaliknya, disebut potensial membran positif.¹¹

Pada keadaan istirahat, bila perbedaan potensial diukur dengan galvanometer akan mencapai -90 mV, membran sel ini disebut dalam keadaan polarisasi, dengan suatu potensial membran istirahat -90 mV.^{11,12}

Apabila terdapat rangsangan terhadap membran dengan mempergunakan listrik, mekanik atau zat kimia maka butir-butir membran akan berubah dan beberapa ion Na^+ akan masuk dari luar sel ke dalam sel, keadaan polarisasi normal sebesar -90 mV akan hilang dan potensial meningkat dengan cepat ke arah positif. Keadaan di dalam sel akan menjadi kurang negatif dibanding diluar sel dan potensial membran akan meningkat. Keadaan membran ini dikatakan menjadi depolarisasi.^{11,12}

Suatu rangsangan yang cukup kuat akan mencapai titik tertentu sehingga dapat menimbulkan depolarisasi membran yang disebut nilai ambang, dan proses depolarisasi akan berkelanjutan serta ireversibel. Ion-ion Na^+ akan mengalir ke dalam sel secara cepat dan dalam jumlah banyak. Pada keadaan ini potensial membran akan naik dengan cepat

mencapai +40 mV. Terjadinya depolarisasi sel membran secara tiba-tiba disebut potensial aksi, yang berlangsung kurang dari 1 m detik.¹¹

Potensial aksi merupakan fenomena yang memenuhi kaidah keseluruhan atau tidak sama sekali (hukum *all or none*) yang berarti bahwa begitu nilai ambang tercapai, peningkatan waktu dan amplitudo dari potensial aksi akan selalu sama, tidak peduli jenis atau intensitas apapun dari rangsangan. Segera setelah potensial aksi mencapai puncak mekanisme, pengangkutan di dalam sel membran dengan cepat akan mengembalikan ion Na ke luar sel sehingga mencapai potensial membran istirahat (-90 mV). Proses ini disebut polarisasi dan depolarisasi berakhir.¹¹

Siklus kelistrikan sel dimulai dengan suatu rangsangan sampai mencapai nilai ambang potensial aksi kemudian mencapai repolarisasi dan berakhir dengan potensial membran istirahat, keseluruhan siklus ini mencapai 3 milidetik.¹¹

2.1.3.2 Perambatan Potensial Aksi

Potensial aksi bisa terjadi apabila suatu daerah membran saraf atau otot mendapat rangsangan mencapai nilai ambang. Potensial aksi mempunyai kemampuan daerah sekitar sel membran untuk mencapai nilai ambang. Sehingga dapat terjadi perambatan potensial aksi ke segala jurusan sel membran. Keadaan ini disebut perambatan potensial aksi atau gelombang depolarisasi.¹¹

Setelah timbul potensial aksi, sel membran akan mengalami repolarisasi. Repolarisasi sel membran disebut tingkat refrakter yang terdiri dari 2 fase yaitu periode refrakter absolut dan periode refrakter relatif.¹¹

Periode refrakter absolut adalah periode yang tidak dapat dirangsang, tidak ada unsur kekuatan untuk menghasilkan potensial aksi yang lain. Periode refrakter relatif adalah periode setelah sel membran mendekati repolarisasi seluruhnya. Maka dari periode refrakter absolut akan menjadi periode refrakter relatif. Apabila ada stimulus yang kuat secara normal akan menghasilkan potensial aksi yang baru.¹¹

Sel membran setelah mencapai potensial membran istirahat, sel membran tersebut telah siap untuk menghantarkan impuls yang lain. Gelombang depolarisasi setelah mencapai ujung dari saraf atau setelah terjadi depolarisasi seluruhnya, gelombang tersebut akan berhenti dan tidak pernah terjadi aliran balik ke arah mulainya datang rangsangan.¹¹

2.2 HISTOLOGI DAN FISILOGI OTOT RANGKA

2.2.1 Histologi Otot Rangka^{13,14}

Dalam tubuh terdapat lebih dari 500 otot rangka. Pada tingkat mikroskopis sel-sel otot tampak silindris, memiliki panjang rata-rata 1-40nm dan diameter 10-100µm. Sel-sel tersebut memiliki sitoplasma sel otot yang disebut juga sarkoplasma dengan banyak inti atau multinuklear, dengan nukleus di perifer sel atau hanya dibawah sarkolemma atau membran plasma. Kearah luar sarkolemma

adalah lapisan glikosilat dari serabut-serabut kolagen yang disebut lamina eksterna. Lapisan glikosilat ini terdiri dari protein yang berfungsi sebagai enzim. Sedangkan ke arah dalam sarkolema dilapisi protein distrofin yang memberi kekuatan mekanis pada membran sehingga terlindung dari stress selama kontraksi otot.

Seluruh otot diselubungi jaringan kolagen dan fibroblas yang dikenal sebagai epimysium. Perluasan selubung ini diteruskan kedalam bagian inferior otot membagi otot kedalam kelompok-kelompok kecil miofibril yang disebut fasikulus. Fasikulus diselubungi jaringan penghubung yaitu perimisium. Di dalam fasikulus miofibril dikelilingi endomysium.

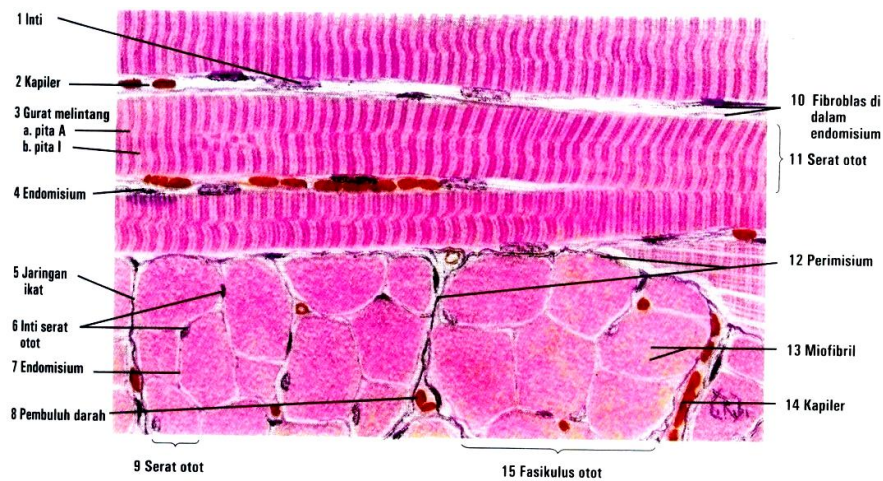
Endomysium kaya pembuluh darah dan serabut saraf, lalu kemudian seluruh jaringan akhirnya menjadi satu pada sambungan tendo. Tendo merupakan bagian yang mentransmisi seluruh kekuatan kontraksi melalui serabut otot ke tulang.

Setiap serabut otot terisi oleh kelompok-kelompok miofibril yang terbentuk dari miofilamen. Masing-masing miofilamen yang merupakan protein kontraktile di dalam sel otot dibagi kedalam segmen-segmen yang dikenal dengan garis z yang terdiri dari aktin dan miosin. Filamen tipis disebut aktin dan filamen tebal disebut myosin. Pada penampang melintang, setiap satu filamen tebal dikelilingi oleh enam filamen tipis. Pengaturan berulang pada unit aktin dan miosin dikenal dengan sarkomer.

Sarkomer merupakan unit kontraktile dasar dari serabut otot dan meluas dari garis z ke garis z lainnya. Pola terang dan gelap pada sarkomer menunjukkan jumlah filamen aktin dan miosin. Molekul aktin terdiri dari dua jenis yaitu aktin G dan aktin F terdapat tempat melekat molekul aktin lainnya seperti molekul miosin, tropomiosin, troponin I dan ATP. Aktin F merupakan protein fibrous yang berfungsi sebagai kerangka dari filamen aktin.

Suatu sistem saluran anastomose membranosa paling dalam yang dikaitkan dengan permukaan masing-masing miofibril lainnya. Ion Ca^{++} diperlukan untuk kontraksi otot yang dilepaskan dari retikulum sarkoplasma dan diserap kembali oleh retikulum sarkoplasmik.

Tubulus T merupakan perluasan dari sakolemma ke dalam inferior serabut-serabut otot. Pada gabungan dalam selubung dari tubulus T dengan mengasosiasikan pemuatan retikulum sarkoplasmik menjadi ikatan yang dikenal sebagai sisterna terminal. Fungsi tubulus T adalah memperluas gelombang depolarisasi dari kontraksi otot melalui seluruh miofibril otot.



Gambar 1. Histologi otot rangka
 Eroschenko, VP. 2003. Atlas histologi di Fiore. Edisi 9.

2.2.2 Mekanisme Kontraksi dan Relaksasi^{11,12,14}

Mekanisme kontraksi otot terjadi melalui beberapa tahapan yaitu dimulai pada terjadinya aksi potensial pada motoneuron yang menyebabkan pelepasan asetilkolin. Potensial aksi dimulai dari neuromial junction merupakan titik kontak antara saraf dan permukaan serabut otot, memiliki sejumlah kekhususan morfologi dan biokimia sehingga dapat meneruskan impuls elektrik secara langsung dari saraf ke miofibril.¹¹

Asetilkolin akan terikat dengan reseptor otot yang menyebabkan potensial *end plate*. Saluran Na^+ terbuka dan ion Na^+ masuk kedalam sel otot tersebut menyebabkan ion Ca^{++} intrasel dari sisterna retikulum sarkoplasma.

Depolarisasi dari retikulum sarkoplasma terjadi dengan mengaktifkan saluran Ca^{++} pada tubulus T melalui reseptor dihidropiridin yang terdapat pada saluran Ca^{++} . Ion Ca^{++} dari retikulum sarkoplasma ini akan terikat dengan troponin C dan selanjutnya merubah konfigurasi troponin-tropomiosin kompleks dan terjadi sliding dari filamen aktin-miosin. Proses ini disebut proses eksitasi kontraksi kopling.

Dalam beberapa detik setelah proses kontraksi, ion Ca^{++} akan dipompa kembali kedalam sisterna retikulum sarkoplasma oleh pompa Ca^{++} (Ca ATPase) yang terdapat pada membran retikulum sarkoplasma. Dengan tidak adanya ion Ca^{++} , troponin-tropomyosin kompleks akan kembali ke konfigurasi semula, dan tropomiosin akan kembali menutupi bagian aktif dari aktin sehingga menghalangi interaksi aktin dan miosin lalu terjadilah relaksasi

Ca^{++} yang dipompa kembali ke dalam sisterna retikulum sarkoplasma oleh pompa Ca^{++} akan terikat dengan protein pengikat Ca^{++} yang terdapat dalam sisterna. Protein ini dapat mengikat ion Ca^{++} dalam jumlah besar. Ion Ca^{++} yang terikat protein ini kemudian akan dilepaskan kembali ke retikulum sarkoplasma pada saat kontraksi berikutnya.

2.3 TRAUMA SENGATAN LISTRIK

Besarnya pengaruh paparan listrik pada jaringan tubuh tergantung dari tegangan (voltase), kuat arus (ampere), tahanan (keadaan kering atau basah), waktu kontak, serta luasnya daerah kontak.^{1,6,15,16}

1. Voltase atau tegangan (V)

Tegangan atau beda potensial dalam bahasa Inggris disebut *voltage* adalah kerja yang dilakukan untuk menggerakkan satu muatan (sebesar 1 coulomb) pada elemen atau komponen dari satu komponen/kutub ke komponen/kutub lain. Tegangan adalah sumber utama atau tekanan yang menyebabkan listrik mengalir melalui sebuah konduktor dan dihitung dalam satuan volt.^{7,17}

Cedera akibat sengatan listrik dibagi menjadi cedera akibat tegangan tinggi dan tegangan rendah. Batas yang digunakan berbeda-beda, umumnya 500 V atau 1.000 V. Walaupun keduanya menyebabkan kecacatan dan kematian yang signifikan, namun arus tegangan tinggi menghasilkan kuat arus yang lebih besar, sehingga menyebabkan kerusakan yang lebih parah pada jaringan.⁶

Kematian orang akibat trauma arus listrik tegangan rendah berbeda dengan mereka yang terkena arus tegangan tinggi. Dimana pada voltase rendah,

penyebab kematian biasanya karena terjadinya fibrilasi ventrikel. Sedangkan pada voltase tinggi, penyebab kematian biasanya karena luka bakar atau panas yang dihasilkan oleh listrik tersebut.¹⁸

2. Resistensi (R)^{6,17}

Resistensi atau tahanan adalah kecenderungan materi untuk melawan aliran arus listrik. Tahanan dihitung dalam satuan Ohm. Besarnya tahanan pada manusia tergantung dari banyak sedikitnya air, kelembaban, dan temperatur tubuh.

Semakin tinggi tahanan suatu jaringan atau organ terhadap arus listrik, maka semakin besar pula potensi energi listrik menjadi energi panas.⁹ Tahanan paling besar adalah kulit kemudian tulang, lemak, saraf, otot, darah dan yang paling rendah adalah cairan tubuh.¹⁸ Sebagian besar resistensi tubuh terdapat pada kulit. Semakin tebal kulit, semakin besar resistensinya. Resistensi ini menurun apabila terdapat kerusakan pada kulit atau ketika kulit basah. Apabila resistensi kulit tinggi, kerusakan yang timbul biasanya hanya kerusakan lokal. Sebaliknya apabila resistensi turun, maka kerusakan yang timbul lebih bersifat sistemik. Sebagian besar luka bakar yang dengan keadaan kulit yang basah lebih sering menyebabkan kerusakan organ dalam.⁶

3. Kuat arus (I)

Arus adalah perubahan kecepatan muatan terhadap satuan atau muatan yang mengalir dalam satuan waktu atau aliran elektron dari sumber tegangan yang melalui suatu konduktor dan dihitung dalam satuan ampere (A).¹¹ Sesuai dengan hukum Joule, panas yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat kuat arus.

Besar kuat arus ditentukan oleh tegangan dan resistensi dari suatu konduktor. Kuat arus berbanding lurus dengan luas penampang konduktor logam, dan berbanding terbalik dengan panjang konduktor. Konduktor logam merupakan konduktor yang baik karena elektron mudah berpindah. Konduktor tembaga adalah konduktor yang sering digunakan dalam rumah tangga.⁶

Literatur menyebutkan ada dua macam arus yang diketahui yaitu:

1. Arus searah (*Direct Current/DC*)

Adalah arus yang mempunyai nilai tetap/konstan terhadap satuan waktu. Dimanapun kita meninjau arus listrik pada waktu berbeda, maka kita akan mendapatkan nilai yang sama. Sumber ini akan menghasilkan beban yang konstan untuk berbagai hambatan sumber.¹⁹

2. Arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*)

Adalah arus yang mempunyai nilai yang berubah terhadap satuan waktu dan berulang untuk periode waktu tertentu.¹⁷

Dari penelitian-penelitian sebelumnya didapatkan bahwa nilai ambang persepsi (*threshold of perception*) rata-rata 1,1mA untuk laki-laki dan 0,7mA untuk wanita. Sementara nilai ambang persepsi minimum adalah 0,5mA. Sementara kuat *Let-go current* (kuat arus yang menyebabkan otot-otot fleksor berkontraksi namun masih dapat tarikan tangan kembali dari sumber arus) adalah rata-rata 16mA pada laki-laki dan 10,5mA pada wanita dengan nilai minimum 9,5mA pada laki-laki dan 6mA pada wanita.¹¹

Arus listrik bolak balik (AC) lebih berbahaya daripada arus listrik searah (DC).²⁰ Arus listrik sebesar 50-80mA AC dapat berakibat fatal dalam waktu singkat, sementara arus 250mA (DC) dengan lama paparan yang sama tidak berakibat fatal. Manusia lebih sensitif, yaitu sekitar 4-6 kali terhadap arus AC daripada DC.

Arus DC menyebabkan satu kontraksi otot. Sedangkan arus AC menyebabkan kontraksi otot yang kontinyu (tetani) dan lebih mudah mengakibatkan aritmia pada jantung. Pada arus AC 100mA dapat menimbulkan fibrilasi ventrikel dan kematian sementara pada arus DC dapat menimbulkan efek yang sama jika arus lebih dari 4A. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan arus AC 100mA karena berbagai jurnal dan literatur menyebutkan bahwa arus AC 100mA adalah arus yang banyak menyebabkan kematian.^{1,6}

3. Waktu (t)

Lamanya kontak dengan sengatan listrik berbanding lurus dengan pemanasan elektrotermal dan derajat kerusakan jaringan yang terkena.⁹ Waktu paparan yang semakin besar menyebabkan semakin banyak energi yang dihantarkan ke jaringan, apabila jaringan tidak mampu menghilangkan energi ini, jaringan akan memanaskan sampai terbakar. Semakin pendek waktu paparan, semakin besar arus yang dibutuhkan untuk menimbulkan fibrilasi ventrikel. Fibrilasi ventrikel dapat terjadi pada arus sebesar 120mA dalam jangka waktu 4 detik, sementara pada arus listrik 1,2 A terjadi dalam waktu 0,1 detik.^{1,18}

4. Arah aliran

Kematian dapat terjadi bila arah aliran arus listrik melewati otak dan jantung, misalnya arah aliran dari kepala ke kaki atau dari lengan ke lengan. Arus yang melewati jantung atau rongga dada dapat menyebabkan disritmia dan kerusakan miokardium secara langsung. Arus yang melewati otak akan menyebabkan kegagalan nafas.⁶

Tubuh manusia dapat menjadi penghantar listrik, yaitu saat tubuh kontak dengan permukaan yang memiliki energi listrik.¹⁸ Mekanisme kematian akibat sengatan listrik biasanya terjadi seketika, tetapi dapat juga tertunda beberapa jam. Penyebab tersering kematian tersebut umumnya karena henti jantung dan gagal nafas. Walaupun banyak peneliti mengklaim bahwa gagal nafas masih dapat diatasi dengan alat bantu pernafasan karena merupakan akibat dari spasme laring, namun umumnya henti jantung tidak dapat diselamatkan. Henti jantung ini terjadi akibat fibrilasi ventrikel^{11,20} namun ada juga yang berpendapat bahwa henti jantung terjadi karena adanya stimulasi terhadap saraf kranial vagal.²⁰

5. Pengaruh Frekuensi Listrik Pada Tubuh¹¹

Frekuensi listrik yang diukur dengan satuan *Hertz* (Hz) menunjukkan kerapatan arus listrik bolak-balik. Frekuensi listrik 60Hz menunjukkan arus tersebut berulang 60 putaran setiap detiknya (1 siklus menunjukkan periode yang dibutuhkan oleh elektron dari satu titik menuju titik lainnya)

a. Listrik berfrekuensi rendah (20 – 500.000 Hz)

Arus listrik dengan frekuensi rendah merangsang saraf dan otot sehingga terjadi kontraksi otot. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada pengulangan pemakaian dan pemilihan bentuk gelombang yaitu:

- i. untuk pemakaian singkat & merangsang saraf otot dengan menggunakan arus faradik.
- ii. untuk pemakaian lama & merangsang otot yang telah kehilangan persyarafan dapat menggunakan arus listrik interruptus atau arus DC yang dimodifikasi

Arus AC dengan frekuensi rendah, mampu :

1. Merangsang saraf sensoris
2. Merangsang saraf motoris
3. Berefek kontraksi otot

b. Listrik berfrekuensi tinggi (> 500.000 Hz)

Belum dapat merangsang saraf motoris & sensoris . Arus listrik pada frekuensi ini hanya bersifat memanaskan. Dalam kedokteran dibagi kedalam dua kategori yaitu diatermi gelombang pendek dan diatermi gelombang mikro

2.3.1 Mekanisme Terjadinya Jejas Akibat Sengatan Listrik.¹⁷

Beberapa mekanisme kerusakan organ setelah terpapar oleh listrik, yaitu :

1. Elektroporasi

Teori tentang elektroporasi adalah teori yang dapat mengidentifikasi adanya arus listrik yang cukup signifikan sebagai

penyebab trauma. Pada elektroporasi membran sel mengalami ruptur, metabolisme terhambat dan kemudian sel mengalami kematian.⁴

Literatur lain menyebutkan bahwa elektroporasi adalah perubahan permeabilitas membran sel oleh karena adanya medan listrik. Elektroporasi ini dapat terjadi baik pada sel peka rangsang maupun pada sel yang tidak peka rangsang dan dapat mengakibatkan kerusakan sel yang ireversibel. Peranan elektroporasi ireversibel diperkirakan terbatas pada arus lebih dari 200mA. Elektroporasi dapat menyebabkan kematian sel secara perlahan.¹⁸

2. Tetani

Tetani dapat terjadi sebagai akibat lanjut dari peristiwa elektroporasi, karena terjadi perubahan membran sel maka permeabilitas sel pun terganggu, hingga akhirnya memicu tetani.¹³ Tetani lebih banyak terjadi pada arus listrik bolak-balik dengan frekuensi rendah antara 15-150 Hz. Dengan frekuensi ini, otot distimulasi untuk berkontraksi sebanyak 40-110 kali perdetik. Hal inilah yang dapat menyebabkan pegangan tangan pada sumber listrik seringkali tidak dapat dilepas, akibat adanya kekuatan otot fleksor yang lebih kuat dari otot ekstensor.⁷

3. Panas

Trauma panas disebabkan akibat pemanasan jaringan yang merupakan respon gabungan tahanan jaringan tubuh, kepadatan arus, dan durasi kontak.⁴ Trauma ini disebabkan karena adanya perubahan dari energi listrik menjadi energi panas yang menyebabkan terjadinya

kerusakan jaringan yang berat dan nekrosis koagulasi. Kerusakan tipe ini banyak terjadi pada paparan arus dengan tegangan tinggi dan hampir tidak terjadi pada tegangan rendah. Jenis lesi yang paling parah terjadi pada kasus dimana objek merupakan bagian dari lengkung elektrik (*electric arc*). Lengkung elektrik adalah suatu percikan arus listrik yang timbul diantara dua permukaan objek yang tidak bersentuhan memiliki beda potensial yang sangat besar, biasanya pada sumber arus tegangan tinggi dengan *ground*. Karena besarnya perbedaan potensial ini, dapat timbul panas sampai temperatur 2500°C. Panas ini dapat menimbulkan luka bakar yang sangat pada titik kontak dengan kulit.⁶

4. Pengaruh tidak langsung akibat terjatuh setelah tersengat listrik

Trauma mekanik terjadi sebagai hasil dari jatuh atau kontraksi otot yang hebat. Kedua hal ini dapat menyebabkan terjadinya fraktur dan dislokasi sendi. Seperti yang telah disebutkan pada pembahasan sebelumnya, arus bolak-balik menyebabkan kerusakan lebih fatal dibandingkan dengan arus searah karena dapat menyebabkan kontraksi otot yang berulang.⁸

2.3.2 Kerusakan pada Otot Rangka akibat Trauma Sengatan Listrik

Efek sengatan listrik dapat menimbulkan efek spasme pada otot skelet jika besar arus mencapai 10 dan 40 mA pada frekuensi 50 siklus perdetik. Spasme ini terjadi seringkali titik masuk arus di tangan, kekuatan otot fleksor tangan menjadi

kaku. Hal inilah yang menyebabkan benda apapun yang menyentuh tangan akan digenggam erat (*hold on effect*).¹

2.3.3 Gambaran Kerusakan Jaringan pada Otot Rangka Akibat Trauma Sengatan Listrik

Penelitian tahun 1965 pada hewan coba anjing hidup dengan menggunakan arus bolak balik dan arus searah hasil biopsi menunjukkan peningkatan jumlah inti dalam setiap serabut otot. Selanjutnya proliferasi ini menghasilkan penggumpalan sejumlah besar inti yang melampaui lebar setiap serabut otot.²¹

Perubahan patologis lainnya meliputi pewarnaan basofilik pada sarkolema, vakuolisasi, hilangnya serat menyilang, penggumpalan sarkoplasma, nekrosis yang nyata dengan pembengkakan retikulum sarkoplasma. Membran sarkoplasma sepenuhnya hancur. Hal ini menandai adanya nekrosis dari miofibril.²¹

Tidak ditemukan sel radang atau lesi vaskular pada penemuan ini. Pada spesimen yang diamati selama 30 hari perubahan menetap dengan adanya atrofi otot, infiltrasi lemak, dan perubahan regeneratif. Pada tahap selanjutnya dapat terjadi nekrosis yang jelas dengan penghancuran dari retikulum yang tertanam dalam serabut otot.²¹

Penelitian tersebut diatas bertujuan untuk mengetahui efek sengatan listrik dalam resusitasi jantung, membandingkan efek patologik arus bolak-balik dan arus searah, dan menentukan hubungan antara arus yang digunakan dengan lesi yang muncul.²¹

Pada kasus kematian akibat sengatan listrik pemeriksaan jaringan otot rangka juga ditemukan kontraksi serat otot dan pepadatan pita z. Tanda khas yang menunjukkan trauma listrik yang patologis adalah pita otot yang hiperkontraksi yang terlihat seperti kulit kayu serta adanya agregasi trombosit intravaskular. Adanya gambaran mikroskopis tersebut erat kaitannya dengan hubungan antara topografi jaringan dengan jalur arus. Selain itu ditemukan pula pembengkakan mitokondria, filamen struktur aktin dan myosin menghilang, perdarahan, laserasi serat otot, dan perubahan panas.²²

Penelitian tahun 1984 pada tikus yang dipapar dengan arus bolak-balik 150mA pada tegangan 220V selama 15 detik memperlihatkan gambaran hiperkontraksi pita otot, nekrosis, dan pengosongan pipa sarkolema. Sedangkan pada arus bolak-balik AC 400mA pada tegangan 270V selama 30 detik secara mikroskopis memperlihatkan kontraksi dan penempelan pita I, penggumpalan protein intratubuler, tubulus yang mengalami dilatasi hidropik, dan tubulus sarkoplasma yang sebagian menjadi transparan, serta adanya retensi stria transversal.²²

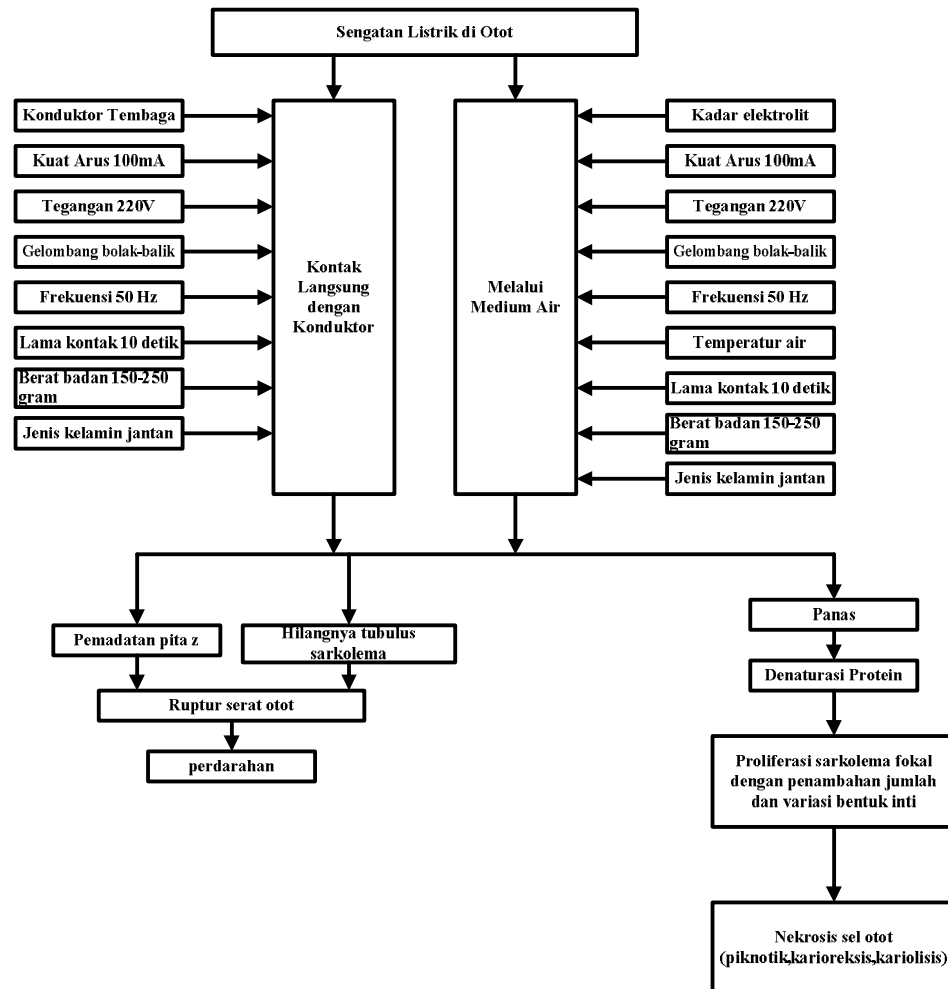
Penelitian tahun 2006, menyatakan bahwa terdapat perbedaan gambaran histopatologi otot ekstremitas paha kanan tikus pada perbedaan voltase. Penelitian ini menggunakan lama paparan selama 5 detik, kuat arus 0,1 mA dengan tegangan yang berbeda yaitu 110V, 220V, dan 600V.⁷ Penelitian tersebut dilakukan tanpa menggunakan air sebagai mediator serta dikontakkan langsung pada otot ekstremitas. Hasil penelitian pada tegangan ringan 110V ditemukan adanya kontraktilitas dan hiperemi, kemudian tegangan sedang 220V ditemukan nekrosis

otot, dan pada voltase tinggi 600V ditemukan ruptur serat otot. Nekrosis sel otot akibat denaturasi protein ini selain dapat ditemukan pada peristiwa sengatan listrik juga dapat ditemukan pada korban hipertermi. Penelitian tersebut dirancang dengan menggunakan peralatan spesifik sesuai dengan peralatan listrik bertegangan tinggi.²³

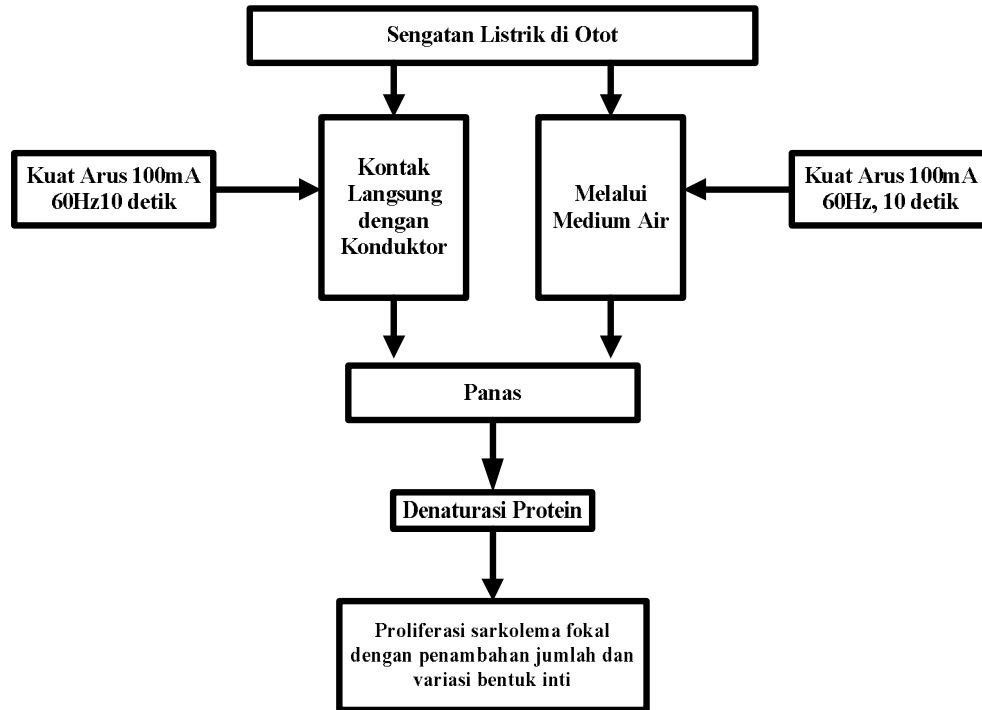
Dalam kajian ilmu patologi anatomi pada peristiwa nekrosis, keseluruhan sel termasuk sitoplasma sel dan inti sel mengalami perubahan. Nekrosis merupakan korelasi makroskopik dan histologik pada kematian sel yang terjadi di lingkungan cedera eksogen ireversibel. Gambaran morfologik nekrosis merupakan hasil dua proses penting yang terjadi bersamaan, yaitu digesti enzimatik dan denaturasi protein.²³

Sel yang mati memperlihatkan peningkatan pewarnaan eosinofil akibat meningkatnya pengikatan eosin oleh sel yang terdenaturasi dan hilangnya basofil dalam RNA. Sel lebih tampak seperti kaca dibanding sel yang masih hidup. Perubahan inti sel memberikan satu dari tiga pola yang semuanya disebabkan karena pemecahan nonspesifik DNA.²³ Pola pertama inti melisut, batas tidak teratur, berwarna lebih gelap pada pengecatan, gambaran inilah yang dinamakan piknotik. Gambaran lain yang dapat ditemukan adalah hancurnya inti sel dengan meninggalkan pecahan zat kromatin, proses ini kemudian disebut karioreksis. Lalu setelahnya inti sel mengalami kematian sehingga kehilangan kemampuan untuk menyerap warna pada pengecatan, inilah yang selanjutnya disebut kariolisis.²⁴

2.4 KERANGKA TEORI



2.5 KERANGKA KONSEP



2.6 HIPOTESIS PENELITIAN

Terdapat perbedaan antara kerusakan otot ekstremitas tikus *Wistar* akibat paparan arus listrik bolak – balik secara kontak langsung dan melalui media air.