

**Efek Paparan Arus Listrik terhadap Jumlah Titik
Hiperkontraksi Otot *Gastrocnemius* dan Kadar Kreatin
Kinase Serum Tikus Wistar**

*The Effect of Electric Current towards Hypercontraction on
Gastrocnemius muscles and Creatine Kinase Serum Level of Wistar
Rats*



Tesis
Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-2
dan memperoleh keahlian dalam Ilmu Kedokteran Forensik dan
Medikolegal

Arfi Syamsun

**PROGAM PASCASARJANA MAGISTER ILMU
BIOMEDIK
DAN
PROGRAM PENDIDIKAN DOKTER SPESIALIS I
ILMU KEDOKTERAN FORENSIK DAN
MEDIKOLEGAL
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2010**

TESIS

**EFEK PAPAN ARUS LISTRIK TERHADAP JUMLAH TITIK
HIPERKONTRAKSI OTOT *GASTROCNEMIUS* DAN KADAR KREATIN
KINASE SERUM TIKUS WISTAR**

Disusun oleh

Arfi Syamsun

**Telah dipertahankan di depan tim penguji pada tanggal 4 Mei 2010 dan
dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima**

**Menyetujui
Pembimbing**

Pembimbing

Pembimbing

**dr. Gatot Suharto, SH, Msi.Med, SpF
NIP. 19520220 198603 1 001**

**dr. Udadi Sadhana, M.kes, SpPA
NIP. 19630821 199103 1 001**

Mengetahui,

**Ketua Program Studi Magister Ilmu
Biomedik Program Pascasarjana
UNDIP**

**Ketua Program Studi Ilmu
Kedokteran
Forensik dan Medikolegal Fakultas
KedokteranUNDIP**

**DR. dr. Winarto, SpMK, SpM(K)
NIP. 19490617 197802 1 001**

**dr. Gatot Suharto, SH, Msi.Med, SpF
NIP. 19520220 198603 1 001**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini merupakan hasil pekerjaan saya sendiri dan didalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan lembaga pendidikan lainnya. Pengetahuan yang diperoleh berasal dari hasil penerbitan maupun yang belum / tidak diterbitkan, sumbernya dijelaskan di dalam tulisan dan daftar pustaka.

Semarang, 22 Maret 2010

dr. Arfi Syamsun
NIM G4M007009

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : dr. Arfi Syamsun
NIM : G4M007009
Tempat/Tanggal lahir : Kuang, 8 Januari 1979
Agama : Islam
Jenis Kelamin : Laki
Alamat : Perumahan Sandik Permai Blok C No 20, Desa Sandik,
Kec Batulayar, Kab Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat

Riwayat Pendidikan

1. SD : lulus 1991
2. SMP : lulus 1994
3. SMA : lulus 1997
4. FK UNDIP : lulus 2003

Riwayat Pekerjaan : Dosen Ilmu Anatomi dan Ilmu Kedokteran Forensik
Fakultas Kedokteran Universitas Mataram, NTB

Riwayat Keluarga

Nama istri : Dewi Wahyuningsih, A.Md.Keb
Nama orang tua ayah : H. Muhdar
ibu : Nurhayati
Alamat orang tua : Tangun, Desa Sukaraja, Kec Jeroaru, Kab Lombok Timur,
NTB
Nama anak : Mielosita Hasanah
Satria Ananta Syamsu

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala kemudahan dan kelancaran yang telah dianugerahkan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul "Efek Paparan Arus Listrik secara Langsung dan Melalui medium Air terhadap Jumlah Nekrosis dan Jumlah Titik Hiperkontraksi Serabut Otot Gastrocnemius serta Kadar Kreatin Kinase Serum Tikus Wistar" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh derajat sarjana S2 di bidang Ilmu Biomedik Program Pasca Sarjana dan Program Pendidikan Dokter Spesialis I Ilmu Kedokteran Forensik dan Medikolegal Universitas Diponegoro Semarang.

Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menghaturkan rasa terima kasih kepada :

1. dr. Gatot Suharto, SH, Msi.Med, SpF dan dr. Udadi Sadhana,Mkes, SpPA selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dengan penuh kesabaran untuk membimbing .
2. Prof. DR. dr. H. Tjahjono, SpPA(K), FIAC, Prof. dr. Lisyani Suromo, SpPK(K), Prof. dr. MI. Widiastuti, PAK,SpS(K), MSc, DR.dr. Winarto, SpMK, SpM(K), dr. Pudjadi, SU, DR. dr. Andrew Johan, Msi selaku narasumber yang telah berkenan memberikan masukan-masukan berharga demi kesempurnaan tesis ini.
3. Mbak Tika beserta tim Laboratorium MIPA UNNES yang membantu penelitian.
4. Pak Karnoto, MT dan Tim Laboratorium Teknik Elektro UNDIP yang telah membantu menyiapkan rangkaian listrik untuk eksperimental sengatan listrik.
5. Istriku Dewi dan anakku Sita yang selalu mendoakan kesuksesan ayah dan agar segera pulang berkumpul menanti kelahiran adik.
6. Teman-teman PPDS I Forensik dan Medikolegal : dr. Ratna yang bersedia bergabung dalam penelitian ini, adik-adik mahasiswa FK UNDIP: Yayuk, Dosi, Ulfa, Cokro, Riri yang rajin membantu penelitian ini.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis sangat menyadari bahwa tesis ini memiliki banyak kekurangan, mengharapkan saran serta kritik demi kesempurnaan tesis ini. Besar harapan bahwa tesis ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak terutama mereka yang bergelut di bidang kedokteran forensik dan medikolegal. Amien.

Semarang, 22 Maret 2010

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman judul	i
Halaman pengesahan.....	ii
Pernyataan	iii
Daftar riwayat hidup	iv
Kata pengantar	v
Daftar isi.....	vi
Daftar tabel.....	x
Daftar gambar.....	xi
Daftar lampiran	xii
Abstrak	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	
1.3.1 Tujuan Umum	4
1.3.2 Tujuan Khusus	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Keaslian Penelitian.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Syok sengatan listrik	
2.1.1. Arus listrik.....	8
2.1.2 Jenis paparan listrik.....	9
2.1.3 Tahanan listrik.....	10
2.1.4 Tegangan listrik.....	11
2.1.5 Lama kontak.....	11
2.1.6 Luas kontak	12
2.1.7 Jalur listrik (<i>electrical pathways</i>).....	12
2.1.8 Jenis kelamin.....	14
2.1.9 Gelombang listrik	14
2.1.10 Frekuensi listrik.....	15

2.2 Mekanisme kerusakan sel otot akibat listrik	
2.2.1 Elektroporasi	15
2.2.2 Denaturasi protein	16
2.2.3 Hiperkontraksi serabut otot rangka	17
2.3 Nekrosis sel otot.....	22
2.4 Kreatin kinase serum.....	24
BAB 3 KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS	
3.1 Kerangka Teori.	26
3.2 Kerangka Konsep	27
3.3 Hipotesis.....	27
BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN	
4.1 Ruang Lingkup Penelitian	
4.1.1 Lingkup Tempat	28
4.1.2 Lingkup Waktu	28
4.1.3 Lingkup Ilmu.....	28
4.2 Rancangan Penelitian	29
4.3 Populasi dan Sampel	
4.3.1 Populasi	30
4.3.2 Sampel	
4.3.2.1 Kriteria Inklusi	30
4.3.2.2 Kriteria Eksklusi	30
4.3.2.3 Besar Sampel.....	30
4.3.2.4 Cara Pengambilan Sampel	30
4.4 Variabel Penelitian	
4.4.1 Variabel bebas	31
4.4.2 Variabel antara	31
4.4.3 Variabel tergantung	31

4.5 Definisi Operasional	
4.5.1 Arus listrik bertingkat	31
4.5.2 Nekrosis otot <i>gastrocnemius</i>	32
4.5.3 Hiperkontraksi otot <i>gastrocnemius</i>	32
4.5.4 Kadar kreatin kinase.....	32
4.6 Alat dan Bahan	
4.6.1 Alat.....	33
4.6.2 Bahan	33
4.7 Prosedur pengumpulan data	34
4.8 Alur kerja penelitian.....	36
4.10 Pengolahan dan Analisis Data.....	37

BAB 5 HASIL PENELITIAN

5.1 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	38
5.2 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum.....	38
5.3 Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> dengan kadar kreatin kinase serum	39
5.4 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot <i>gastrocnemius</i> antar ekstremitas tikus wistar	40
5.5 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> dan kadar kreatin kinase serum antara paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air	42

BAB 6 PEMBAHASAN

6.1 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	43
6.2 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum.....	44
6.3 Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> dengan kadar kreatin kinase serum	45
6.4 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot <i>gastrocnemius</i> antar ekstremitas tikus wistar	45
6.5 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> dan kadar kreatin kinase serum antara paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air	47

BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan	49
7.2 Saran	50

Daftar pustaka

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Matriks keaslian penelitian	6
Tabel 2. Pengaruh syok listrik terhadap organ tubuh.....	9
Tabel 3. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	38
Tabel 4. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum	39
Tabel 5. Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> dengan kadar kreatin kinase serum.....	39
Tabel 6. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan listrik secara langsung	40
Tabel 7. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot <i>gastrocnemius</i> antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan listrik melalui medium air	41
Tabel 8. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> akibat paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air	42
Tabel 9. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Mekanisme ‘berjalan-jalan’ aktin-miosin dalam kontraksi otot	19
Gambar 2. Penyempitan antar pita Z selama proses kontraksi-relaksasi otot.....	20
Gambar 3. Hiperkontraksi serat otot paha tikus wistar	21
Gambar 4. Hiperkontraksi (<i>wave-like arrangement</i>) serat otot korban petir	21
Gambar 5. Hiperkontraksi serat otot tikus pada paparan listrik bolak balik.....	22
Gambar 6. Nekrosis sel otot paha tikus wistar.....	24
Gambar 7. Skema rancangan penelitian paparan listrik pada tikus wistar.....	29

DAFTAR LAMPIRAN

1. *Ethical clearance*
2. Data kadar keratin kinase serum
3. Data jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*
4. Analisis spss uji korelasi Spearman
5. Analisis spss uji *One way ANOVA*
6. Analisis spss uji korelasi pearson
7. Analisis spss uji t-tidak berpasangan
8. Metode baku pembuatan preparat histologis
9. Rangkaian listrik untuk penelitian eksperimental sengatan listrik
10. Foto preparat histopatologis otot *gastrocnemius* tikus wistar
11. Data kuat arus listrik, tegangan listrik, dan tahanan listrik selama proses paparan listrik

ABSTRAK

Latar belakang : efek paparan arus listrik diperkirakan melalui hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum. Tujuan penelitian ini adalah untuk membuktikan efek paparan arus listrik terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum.

Metode : 54 ekor tikus wistar diambil dengan *simple random sampling*. Sampel dibagi menjadi 9 kelompok, yaitu: kelompok 1-4 terpapar arus listrik secara langsung, yaitu berturut-turut 1-30 mA, 31-60 mA, 61-90 mA, 91-120 mA. Kelompok 5-8 terpapar arus listrik melalui medium air, yaitu berturut-turut 1-30 mA, 31-60 mA, 61-90 mA, 91-120 mA. Kelompok 9 tidak terpapar arus listrik. Setelah adaptasi selama 7 hari, dilakukan paparan arus listrik kemudian dilakukan pemeriksaan kadar kreatin kinase serum dari *plexus retro orbitalis* dengan *COBAS Integra 400 Plus-Roche*. Setelah dekapitasi dilanjutkan dengan pemeriksaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*. Analisis data dilakukan dengan Uji Spearman

Hasil : Terdapat korelasi positif antara besar paparan arus listrik secara langsung dan melalui medium air dengan kadar kreatin kinase serum tikus *wistar* ($\rho = 0,632$; $p = 0,000$, dan $\rho = 0,701$; $p = 0,000$). Terdapat korelasi positif antara besar paparan arus listrik secara langsung dan melalui medium air dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* ($\rho = 0,959$; $p = 0,000$, dan $\rho = 0,910$; $p = 0,000$)

Simpulan : Semakin besar paparan arus listrik, semakin besar jumlah hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum.

Kata kunci : arus listrik, kontak langsung, medium air, otot *gastrocnemius*, hiperkontraksi, kreatin kinase

ABSTRACT

Background: Electric current is assumed to cause hypercontraction on gastrocnemius muscles and disturbance of creatine kinase serum level of Wistar rats. This study aim to prove the effect of electric current in graded doses towards hypercontraction on gastrocnemius level and creatine kinase serum level of wistar rats.

Method: 54 wistar rats were divided into 9 groups through simple random sampling. Group 1-4 received electric current through direct contact, while group 5-8 received it through water conduction. Group 1 and 5, 2 and 6, 3 and 7, 4 and 8 received 1-30 mA, 31-60 mA, 61-90 mA, and 91-120 mA of electric current respectively. Group 9 was received no treatment. After adaption period for 7 days, electrocution was performed, and then creatine kinase serum level was measured from plexus retro orbitalis by using COBAS Integra 400 Plus-Roche. Rats were then decapitated in order to assess the amount of hypercontraction on gastrocnemius muscle. Statistical analysis was conducted by using Spearman test

Result: There was significant positive correlation between electric current in graded doses and creatine kinase serum level both through direct contact and water conduction ($\rho = 0.632$, $p = 0.000$; and $\rho = 0.701$, $p = 0.000$ respectively). There was significant positive correlation between electric current in graded doses and hypercontraction on gastrocnemius muscle both through direct contact and water conduction ($\rho = 0.959$, $p = 0.000$; and $\rho = 0.910$, $p = 0.000$ respectively).

Conclusion: Higher doses of electric current correlated more numbers of hypercontraction on gastrocnemius muscle and higher level of creatine kinase serum.

Keywords: electric current, direct contact, water conduction, gastrocnemius muscle, hypercontraction, kreatin kinase .

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Efek sengatan listrik terhadap tubuh manusia masih menjadi perdebatan antar ahli forensik hingga saat ini. Kontroversi tersebut terutama dalam aspek penentuan bentuk kerusakan jaringan tubuh dan jenis jaringan yang mengalami kerusakan. Langkah awal penyelidikan jejas sengatan listrik pada permukaan tubuh korban adalah menemukan luka bakar listrik (*electrical marks*) pada kulit.
1,2,3

Bockholdt B, Scheider V (2003) menemukan garis berwarna putih kepuccatan (*border-zone phenomenon*) pada permukaan tubuh korban yang diduga meninggal akibat sengatan listrik melalui medium air, namun tanda tersebut tidak selalu ditemukan pada korban.⁴ Penyelidikan terhadap kerusakan organ tubuh bagian dalam (*internal organ*) pada korban yang diduga tersengat listrik melalui medium air belum pernah dilakukan oleh ahli forensik.

Knight B (1996) dan Shepperd (2003) menemukan bahwa luka akibat sengatan listrik pada permukaan tubuh yang kontak langsung dengan konduktor tidak selalu berbentuk khas (*typical electrical marks*). Gambaran luka bakar tersebut sulit dibedakan dengan luka bakar akibat benda padat lainnya, sehingga keadaan ketidakpastian ini menyulitkan diagnosis sengatan listrik.^{1,2} Derajat

kerusakan jaringan tubuh akibat sengatan listrik rumah tangga yang menggunakan tegangan rendah (*low-voltage electrical injury*) belum pernah diteliti.

Metode diagnosis sengatan listrik masih bersifat penyingkiran terhadap kemungkinan penyebab lain yang beralasan (*exclusion method*). Metode diagnosis eksklusif hanya memberikan bukti petunjuk dalam penyelesaian proses pidana, sedangkan hukum pidana di Indonesia lebih menghendaki adanya bukti mutlak daripada bukti petunjuk.⁵

Fatalitas sengatan listrik ditentukan oleh jumlah arus listrik yang memasuki tubuh, jalur (*electrical pathways*) arus listrik melewati tubuh dan lama kontak dengan listrik. Jaringan otot yang dilalui arus listrik akan mengalami kerusakan melalui mekanisme elektroporasi, panas (*joule heating*), hiperkontraksi dan ruptur serabut-serabut otot. Kerusakan tersebut dapat dikenali lebih awal dari pemeriksaan terhadap molekul-molekul intrasel yang dikeluarkan oleh sel otot, antara lain: peningkatan kadar kreatin kinase serum, mioglobin serum, ion-ion kalium yang dilepaskan oleh sel otot yang mengalami kerusakan.^{6,7,8}

Penelitian-penelitian yang dilakukan pada korban sengatan listrik baik yang menjalani perawatan maupun korban yang meninggal menunjukkan temuan-temuan gambaran luka bakar yang tidak khas dan peningkatan kadar kreatin kinase serum. Penelitian pada hewan coba dengan variasi dosis paparan listrik tidak mematikan (*non-lethal*) dan variasi waktu pengambilan sampel beberapa jam setelah paparan arus listrik menunjukkan temuan gambaran hiperkontraksi

(*contracted, ruptured muscle*), hiperemi, dan nekrosis otot ekstremitas serta peningkatan kadar kreatin kinase serum hewan coba.^{9,10,11,12,13}

Penelitian pada hewan coba dengan menggunakan paparan arus listrik dosis bertingkat untuk menganalisis peningkatan kadar kreatin kinase serum dan kerusakan otot-otot ekstremitas masih belum ada sekarang ini. Kerusakan histopatologik pada otot ekstremitas yang berjarak paling dekat dengan *point of contact* dan *point of grounded* listrik belum pernah dibandingkan dengan kerusakan otot ekstremitas lainnya (*homolateral dan kontralateral*). Pengetahuan tentang perbedaan kerusakan histopatologik antar otot-otot ekstremitas sangat berguna bagi dokter forensik yang akan melakukan pemilihan sampel jaringan untuk membuktikan dugaan sengatan listrik.

Penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya karena selain alasan-alasan yang telah dikemukakan di atas, pengambilan sampel darah dan otot ekstremitas dilakukan segera setelah sengatan listrik untuk mendapatkan gambaran kadar kreatin kinase serum dan kerusakan histopatologis otot ekstremitas sebelum kematian korban, agar gambaran tersebut tidak dikacaukan dengan perubahan sejenis akibat proses *postmortem*. Tingkat kerusakan organ tubuh akibat sengatan listrik ditentukan oleh besarnya arus listrik yang melalui organ-organ tersebut, sehingga pada penelitian ini dilakukan perlakuan paparan listrik dengan dosis bertingkat. Penelitian pendahuluan yang peneliti lakukan menunjukkan bahwa besar arus listrik maksimal yang melewati tubuh tikus wistar selama paparan listrik tegangan 220 Volt (V) adalah 110-128 miliamper (mA).

Penelitian tersebut juga membuktikan bahwa tikus wistar mengalami kematian kurang dari satu jam setelah paparan listrik 110-128 mA selama 60 detik.

Telapak tangan atau telapak kaki paling sering menjadi *point of contact* atau *point of grounded* listrik. Otot ekstremitas yang memiliki berat otot paling besar dan berada paling dekat dengan lokasi *point of contact* dan *point of grounded* listrik adalah otot *gastrocnemius*.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang di atas, maka masalah penelitian ini adalah bagaimanakah efek paparan arus listrik terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum darah tikus wistar?.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

1.3.1 Tujuan Umum

Untuk membuktikan efek paparan arus listrik terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum darah tikus wistar.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Untuk membuktikan korelasi antara paparan arus listrik dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum darah tikus wistar.
2. Untuk membuktikan korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum tikus wistar yang terpapar arus listrik

3. Untuk membuktikan perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar yang terpapar arus listrik.
4. Untuk membuktikan perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik secara langsung dan melalui medium air.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

1. Untuk menambah pengetahuan tentang efek sengatan listrik terhadap organ-organ tubuh yang merupakan jalur listrik (*electrical pathways*) dan organ-organ tubuh yang bukan jalur listrik serta perubahan biokimiawi darah,
2. Untuk mendorong penelitian observasional pada korban yang diduga meninggal karena sengatan listrik tentang efek sengatan listrik terhadap organ-organ tubuh dan perubahan biokimia dalam darah.

1.5 KEASLIAN PENELITIAN

Penelitian tentang efek paparan arus listrik terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum darah tikus *wistar* belum pernah dilakukan. Penelitian yang pernah dilakukan antara lain adalah:

Tabel 1. Matriks keaslian penelitian.

Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian dan Perlakuan	Hasil Penelitian
Smith GT, Beeuwkes R, Tomkmewicz ZM, Abe T, Lown B	Pathological Changes in Skin and Skeletal Muscle Following Alternating Current and Capacitor Discharge	43 ekor anjing mongrel dilakukan syok listrik AC dan DC ,7 hari setelah paparan syok listrik, kulit, jaringan subkutis dan otot ekstremitas dilakukan pewarnaan <i>HE</i> , <i>Mallory trichrome</i> , <i>Weigert's reticulum and PAS</i>	Tingkat keparahan lesi otot lurik, dari ringan sampai berat
Kilic S, Sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S	Correlation of serum procalcitonin and creatine phospo- kinase levels with tissue histopathology in rats exposed to experimental electric injury	32 ekor tikus dilakukan paparan tegangan listrik bertingkat dengan arus listrik 100 mA selama 5 detik. sampel darah dan otot paha diambil setelah 12 jam paska sengatan listrik. Pewarnaan jaringan <i>hematoxylin eosin</i>	Kerusakan otot paha dan kenaikan kadar kreatin kinase serta prokalsiton lebih tinggi pada kelompok keempat dibandingkan dengan kontrol ($p < 0,05$).
Qin ZQ; Gong YC; Huang XH	Ultrastructure changes of electrical injury in rats	Penelitian pada tikus untuk mengamati perubahan ultrastruktur jaringan tubuh akibat paparan listrik tegangan rendah. Pemeriksaan menggunakan mikroskop elektron.	Hasil penelitian adalah : plasma membran epitelium mengalami robekan, hiperkontraksi serabut serat otot rangka, nekrosis dan kehilangan lapisan mielin serabut saraf.

Michiue T, Pathological and Ishikawa T, biochemical analysis Zhao D, of the Kamikodai pathophysiology of Y, Zhu B, fatal electrocution in Maeda H five autopsy cases	otopsi pada 5 jenazah yang meninggal akibat sengatan listrik	Kasus 1-4:lepuh dengan atau tanpa pengarangan, kasus 5: luka bakar dengan pengarangan disertai eritema disekitar luka. Kardiomiolisis terjadi pada kasus 3 dan 4, edema kongestif pada kasus 3 dan 5. Kasus 5 menunjukkan kerusakan otot rangka
Wang XW; Creatinine Jin RX; phosphokinase Bartle EJ; values in electrical Davies JW and thermal burns.	Pemeriksaan kadar kreatin kinase 1 minggu setelah kejadian luka bakar pada 26 orang pasien.	Kadar kreatin kinase meningkat secara bermakna

Penelitian tentang efek paparan arus listrik terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum darah tikus wistar belum pernah dilakukan. Dengan demikian penelitian yang dilakukan merupakan penelitian yang pertama.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Syok Sengatan Listrik

2.1.1 Arus Listrik

Arus listrik merupakan aliran elektron melewati suatu penghantar listrik. Elektron bebas berpindah dari satu atom ke atom logam berikutnya, sedangkan pada bahan air, elektron dibawa oleh elektrolit melewati medium air. Timbulnya gerakan elektron tersebut karena adanya beda potensial antara dua ujung penghantar.^{14,15}

Kerusakan organ dalam (*internal organ*) tubuh korban dipengaruhi oleh jumlah arus listrik yang memasuki organ tubuh. Faktor-faktor yang menentukan besarnya arus listrik adalah tegangan listrik, tahanan listrik, lama waktu kontak dengan paparan listrik. Hal ini sesuai dengan hukum *Ohm* dan hukum *Joule* tentang listrik.¹⁴

Arus listrik bolak balik (*alternating current*) 3 kali lebih berbahaya dibandingkan dengan arus listrik searah (*direct current*) dengan voltase listrik yang sama. Sengatan arus listrik bolak balik menyebabkan kontraksi otot terus menerus (*tetany*) antara 40-110 kali per detik. Kontraksi *tetany* tersebut memungkinkan korban akan menggenggam konduktor secara terus menerus sehingga semakin memperparah keadaan korban. Arus listrik terkonsentrasi pada daerah listrik masuk dan keluar, sehingga kerusakan jaringan terbanyak

didapatkan pada daerah tersebut.¹⁶ Sances dkk mengukur kepadatan (*density*) arus listrik yang melalui kaki babi yang terpapar listrik. Otot rangka merupakan jaringan yang membawa arus listrik paling besar karena otot rangka memiliki proporsi volum yang paling besar dibandingkan jaringan lainnya.¹⁷

Tabel 2. Pengaruh syok listrik terhadap organ tubuh manusia.

Dikutip dari Gabriel JF¹⁴

Arus listrik	Pengaruh ke tubuh	Tegangan yang menghasilkan arus yang diperkirakan sesuai dengan tahanan tubuh	
		10000 Ohm	1000 Ohm
1 mA	Batas nilai ambang persepsi. Merasa geli	10 V	1V
1-8 mA	Sensasi syok, tidak nyeri. Let go current masih dapat terjadi	8-10 V	1-8 V
8-15 mA	Syok disertai rasa nyeri. Let go current masih dapat terjadi	80-150 V	8-15 V
15-20 mA	Syok disertai rasa nyeri dan letih. Let go current tidak dapat terjadi	150-200 V	15-20 V
20-50 mA	Nyeri disertai kontraksi otot yang hebat. Kesulitan bernafas	200-500 V	20-50 V
100-300 mA	Fibrilasi ventrikel dan kelumpuhan pernafasan	200-500 V	20-50 V
6 mA	Fibrilasi ventrikel dan kelumpuhan pernafasan. Luka bakar	60000 V	6000 V

2.1.2 Jenis Paparan Listrik

Paparan listrik secara langsung artinya permukaan tubuh korban bersentuhan dengan konduktor berarus listrik. Pergerakan elektron melalui konduktor dipengaruhi oleh jenis konduktor logam dan suhu konduktor logam tersebut. Kabel listrik pada rangkaian listrik rumah tangga menggunakan konduktor logam tembaga. Semakin tinggi suhu konduktor, maka semakin lambat pergerakan elektron, sehingga semakin sedikit jumlah elektron yang melewati tubuh korban. Contoh kasus kematian akibat sengatan listrik rumah tangga (*low-voltage electrical injury*) secara langsung adalah sengatan listrik oleh *hair dryer*.^{1,2,14,15}

Paparan listrik melalui medium air artinya arus listrik melewati suatu cairan tertentu terlebih dahulu sebelum memasuki permukaan tubuh korban. Jenis cairan menentukan jumlah arus listrik yang dapat melewatinya. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap konduktivitas listrik melalui cairan, yaitu: konsentrasi ion, mobilitas ion, suhu cairan, keadaan oksidasi. Contoh kasus kematian akibat sengatan listrik rumah tangga melalui medium air adalah sengatan listrik di bak mandi berisi air (*bathtub*).^{1,2,18}

2.1.3 Tahanan Listrik

Arus listrik (elektron) akan menghadapi rintangan atau gesekan dari bahan yang dilaluinya, sehingga gerakan elektron berkurang. Energi listrik berubah menjadi energi panas selama proses tersebut.^{14,15,16} Tahanan listrik kulit manusia dewasa adalah 5000 Ohm. Besar tahanan listrik tersebut menjadi 1 juta Ohm jika kulit kering dan terdapat jaringan kalus (*calluse*), namun besar tahanan listrik menjadi 1000 Ohm jika kulit tersebut basah. Tahanan listrik merupakan variabel

penting pada peristiwa perjalanan arus listrik karena arus listrik cenderung melewati jalur yang tahanan listriknnya paling rendah. Urutan besar tahanan listrik beberapa jaringan tubuh dari nilai tertinggi ke terendah adalah sebagai berikut : tulang, lemak, tendon, kulit, otot, darah, saraf (Christensen *et al.*, 1980).¹⁹

Setiap sel memiliki membran dari lapisan lemak yang merupakan tahanan listrik.^{7,14} Syok sengatan listrik akan lebih berat jika kulit korban basah. Kulit yang basah atau berkeringat akan memudahkan arus listrik melewati kulit penderita. Hal ini karena kulit yang basah atau berkeringat memiliki tahanan yang lebih kecil bila dibandingkan kulit yang kering.^{1,2,7,14}

2.1.4 Tegangan Listrik

Tegangan listrik dibagi menjadi 2 kategori, yaitu tegangan tinggi (diatas 500 Volt) dan tegangan rendah (dibawah 500 Volt). Seseorang akan menderita syok sengatan listrik lebih serius pada tegangan 220 Volt daripada tegangan 80 Volt oleh karena dengan tahanan yang sama, kuat arus pada tegangan 220 Volt lebih besar daripada tegangan 80 Volt.⁷

Kematian akibat sengatan listrik pada umumnya terjadi oleh tegangan 110-380 Volt, dimana besar tegangan tersebut sesuai dengan besar tegangan listrik yang terpasang di instalasi listrik rumah tangga dan tempat kerja. Penelitian yang dilakukan oleh Akcan R, Hilal A, Gulmen MK, Cekin N menunjukkan bahwa 34,9% kematian akibat sengatan listrik dikarenakan paparan listrik tegangan rendah di rumah tangga dan tempat kerja.²⁰

2.1.5 Lama Kontak

Lama kontak dengan sengatan listrik menentukan jumlah arus listrik yang memasuki tubuh. Semakin lama kontak antara permukaan tubuh dengan benda berarus listrik maka semakin lama arus listrik memasuki tubuh. Hukum *Joule* tentang listrik menjelaskan bahwa semakin lama listrik memasuki tubuh korban maka semakin besar energi panas yang terbentuk, sehingga mengakibatkan luka bakar yang lebih luas dan dalam (karbonisasi/pengarangan).^{1,2,7,14} LA geddes melakukan percobaan terhadap binatang *ponny* dan anjing. Ternyata nilai ambang fibrilasi akan meningkat bila lama kontak lebih singkat.¹⁴

2.1.6 Luas Kontak

Luas permukaan tubuh yang kontak dengan listrik akan menentukan jumlah arus listrik yang memasuki tubuh korban. Semakin luas area kontak listrik dengan permukaan tubuh korban maka semakin sedikit kerusakan pada permukaan tubuh korban. Hukum *Joule* tentang listrik menjelaskan bahwa semakin luas daerah kontak listrik di permukaan tubuh korban maka semakin sedikit energi panas yang terbentuk, sehingga mengakibatkan luka bakar yang lebih dangkal.^{1,2,7,14}

Arus listrik yang memasuki tubuh melalui permukaan yang luas, misalnya melalui medium air, tidak ditemukan tanda-tanda luka listrik (*electrical marks*). Hal ini karena air menurunkan tahanan listrik, air menurunkan kepadatan arus listrik, dan air mendinginkan jaringan kulit sehingga tidak terbentuk luka bakar.²¹ Gambaran patologis akibat sengatan listrik tegangan rendah tidak ditemukan dipermukaan kulit korban atau ditemukan gambaran sangat minimal, apalagi permukaan tubuh korban basah atau korban berada di lingkungan berair dan

lembab, maka tidak ditemukan tanda-tanda luka listrik meskipun telah dilakukan otopsi. Hal ini karena keadaan tersebut menyebabkan penurunan tahanan permukaan kulit dan penurunan kepadatan arus listrik.²⁰

2.1.7 Jalur Listrik (*electrical pathways*)

Arus listrik memasuki tubuh korban pada suatu titik tertentu (*point of contact*), kemudian arus listrik keluar dari tubuh korban pada suatu titik yang lain (*point of grounded*). Listrik dapat mematikan jika listrik membentuk jalur masuk dan keluar tubuh. Listrik rumah tangga yang berkategori tegangan rendah (kurang dari 500 Volt) dapat mengakibatkan kematian karena ada jalur tertentu yang terbentuk oleh listrik masuk dan listrik keluar. Jalur yang sering menimbulkan kematian adalah jalur listrik yang melalui jantung, otot bantu pernafasan dan otak.

1,2,7,19

Daerah yang paling sering menjadi tempat listrik masuk di permukaan tubuh korban adalah tangan kanan atau tangan kiri korban, kemudian daerah listrik keluar adalah tangan *kontralateral* atau kaki kanan atau kaki kiri korban. Jalur tersebut menyebabkan arus listrik menyeberangi jantung, sehingga menyebabkan gangguan fungsi jantung.^{1,2,7,19} Silversides mengatakan bahwa jalur listrik yang paling sering adalah jalur listrik yang memasuki tubuh melalui tangan hingga keluar di tangan *kontralateral*, listrik masuk di tangan kemudian listrik keluar di kaki, atau listrik masuk di kepala kemudian listrik keluar di kaki. Jalur tangan-tangan mengandung risiko kematian yang paling sering karena melewati jantung (Silversides, 1964).¹⁹

Tempat listrik masuk yang paling sering adalah tangan dan kepala (Cooper, 1995; Solem *et al.*, 1977; Wilkinson and Wood, 1978), sedangkan tempat listrik keluar yang paling sering adalah kaki, tangan, dan tungkai. (Grossman *et al.*, 1993; Solem *et al.*, 1977; Wilkinson and Wood, 1978). Rautji *et al.* melaporkan bahwa pada korban berusia dewasa yang meninggal akibat sengatan listrik, ditemukan listrik masuk di tangan, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Akcan R, Hilal A, Gu' lmen MK, Cekin N listrik masuk di tangan ditemukan pada 72,9 % kasus.²⁰

2.1.8 Jenis Kelamin

Dalziel melakukan penelitian tentang nilai ambang persepsi (arus minimum yang dapat dideteksi) dan *let go current* (arus yang dapat menyebabkan tarikan tangan kembali) yang ditunjukkan oleh distribusi Gaussian yang menyatakan bahwa rata-rata nilai ambang persepsi (*threshold of perception*) untuk laki-laki 1,1 miliamper, sedangkan untuk wanita 0,7 miliamper. Nilai ambang minimum persepsi adalah 500 mikroamper. Rata-rata *let go current* untuk laki-laki 16 miliamper, sedangkan untuk wanita 10,5 miliamper. Minimum *let go current* untuk laki-laki 9,5 miliamper, sedangkan untuk wanita 6 miliamper.¹⁴

2.1.9 Gelombang Listrik

Gelombang listrik terbagi menjadi dua kategori berdasarkan arah aliran arus, yaitu: gelombang bolak balik dan gelombang searah. Arah arus gelombang searah selalu mengalir dalam satu arah, sedangkan arah arus gelombang bolak balik selalu berbalik setiap setengah putaran. Arus searah maupun arus bolak balik

dengan frekwensi rendah mempunyai kemampuan yang serupa yaitu merangsang saraf sensoris, saraf motoris dan otot, namun arus bolak balik menimbulkan fatalitas yang lebih besar daripada arus searah.^{7,14}

Camps et. al(1976) dan Reilly (1998) menjelaskan bahwa arus listrik bolak balik lebih berbahaya daripada arus searah. Arus listrik bolak balik 50-80 miliamper dapat menimbulkan kematian dalam hitungan detik, sedangkan arus listrik searah 250 miliamper tidak membahayakan dalam waktu yang sama.⁷

2.1.10 Frekuensi Listrik

Frekwensi listrik terbagi menjadi dua kategori berdasarkan efek yang timbulkan arus listrik, yaitu: listrik berfrekwensi rendah dan listrik berfrekwensi tinggi. Frekwensi 20 Hz sampai dengan 500.000 Hz disebut listrik frekwensi rendah. Frekwensi ini mempunyai efek merangsang saraf dan otot sehingga terjadi kontraksi otot. Perusahaan Listrik Negara (PLN) menggunakan arus listrik frekwensi 50 Hz.^{14,15}

2.2 Mekanisme Kerusakan Sel Otot akibat Listrik

2.2.1 Elektroporasi

Lee dan Kolodney (1987) mengatakan bahwa elektroporasi adalah mekanisme penting kerusakan jaringan akibat sengatan listrik. Elektroporasi adalah pembentukan kanal-kanal hidrofilik pada membran sel akibat paparan arus

listrik tegangan tinggi selama beberapa detik sehingga mengakibatkan hilangnya permeabilitas membran sel terhadap ion-ion, dan molekul-molekul yang larut dalam air. Lubang-lubang pada membran sel-sel tersebut mengakibatkan materi-materi intraseluler ke luar sel dan mengganggu fungsi sel.⁷

Elektroporasi terbagi menjadi dua kelompok berdasarkan efek reversibilitas sel setelah paparan listrik, yaitu: elektroporasi *reversible* dan elektroporasi *irreversible*. Elektroporasi *reversible* terjadi jika sel terpapar arus listrik 200-500 miliamper selama kurang dari 100 mikrodetik (Benz et al 1979, Abidor et al 1979), sedangkan jika terpapar arus listrik 200-500 miiliamper diatas 100 mikrodetik akan terjadi elektroporasi *irreversible*.^{7,22}

Karakteristik lapisan lipid membran sel sehingga mudah dipengaruhi oleh energi listrik adalah karena lipid memiliki kutub bermuatan listrik dan lipid mempunyai permeabilitas terhadap ion-ion serta molekul hidrofilik. Listrik menyebabkan reorientasi atau konformasi molekul lipid serta mengakibatkan terbentuknya kanal-kanal hidrofilik sehingga membran sel kehilangan fungsi sebagai barier terhadap ion-ion dan molekul hidrofilik.^{7,22,23}

Permeabilitas ion-ion lebih mudah terjadi pada tempat kerusakan membran sel. Kerusakan tersebut ditandai dengan longgarnya ikatan antar molekul lipid, sehingga mempermudah penetrasi ion-ion dan molekul hidrofobik. Kerusakan yang terjadi akibat sengatan listrik dapat dijalarkan ke membran sel sekitarnya serta terjadi dalam hitungan pikodetik sampai detik , selanjutnya terjadi proses pembentukan formasi lipid kembali ke keadaan normal melalui proses rotasi dan

gerakan *flip-flop* molekul lipid. Waktu yang dibutuhkan antara milidetik sampai hitungan hari, sedangkan panas yang terbentuk akan menyebabkan disorientasi molekul lipid hingga merusak molekul lipid.^{7,22,23}

2.2.2 Denaturasi Protein

Arus listrik yang melewati membran sel-sel akan tertahan oleh adanya lapisan lipid yang berada di membran sel. Energi listrik tersebut akan diubah menjadi panas yang membakar sel-sel, sehingga mengakibatkan kerusakan ikatan kimia molekul protein (denaturasi) dan koagulasi protein baik protein yang membentuk membran sel maupun protein intraseluler lainnya. Sel tersebut juga kehilangan kemampuan permeabilitasnya, sehingga materi-materi intraseluler keluar melewati membran sel, akhirnya sel otot akan mengalami kematian (nekrosis). Materi intraseluler tersebut adalah enzim-enzim sel, elektrolit-elektrolit (kalium, klorida).^{24,25,26,27,28}

Ada dua mekanisme kerusakan membran sel otot akibat sengatan listrik yaitu: panas (*joule heating*) dan elektroporasi.^{7,22,27,28} *Joule heating* terjadi disekitar area kontak dengan konduktor namun pada jaringan yang jauh dengan area kontak akan terjadi kerusakan membran sel melalui proses elektroporasi. Kedua mekanisme kerusakan sel otot tersebut ditentukan oleh lama kontak dan jumlah arus yang memasuki tubuh. Jika kontak berlangsung singkat akan didominasi oleh elektroporasi.^{7,22}

Kontak berlangsung lama dan medan listrik yang besar maka *joule heating* akan mendominasi kerusakan membran sel sehingga menutupi kerusakan

membran sel akibat elektroporasi. Pada jaringan yang dilewati arus listrik akan ditemukan gambaran *joule heating* dan elektroporasi yang tersebar tidak merata. Zimmerman (1986) mengatakan bahwa perbedaan antara elektroporasi dan *joule heating* adalah waktu terjadinya. Elektroporasi terjadi hanya dalam hitungan kurang dari 100 mikrodetik, sedangkan *joule heating* terjadi lebih dari satu menit setelah paparan listrik. Dengan demikian elektroporasi terjadi jauh lebih cepat dari *joule heating*.^{7,22}

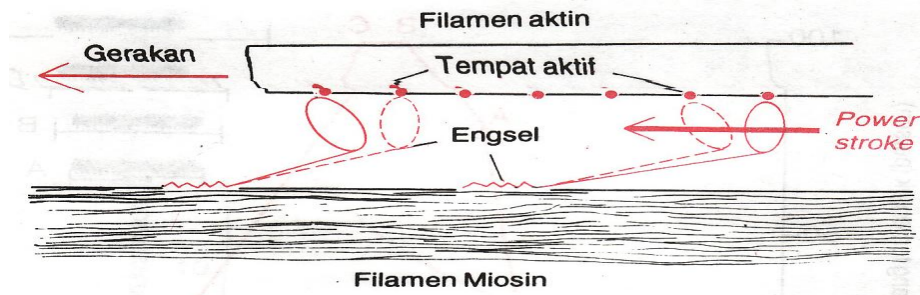
2.2.3 Hiperkontraksi Otot Rangka

Listrik akan menyebabkan stimulus yang terus menerus pada *voltage-gate channels* membran sel sehingga terjadi hiperpolarisasi membran sel.²³ Arus listrik bolak balik akan menyebabkan proses depolarisasi-repolarisasi secara terus menerus. Tetani ini 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.⁷

Otot rangka merupakan salah satu jaringan tubuh yang mempunyai kelistrikan yang diperankan oleh ion-ion intrasel dan ekstrasel. Rangsangan listrik mengakibatkan perubahan potensial membran istirahat yang ditandai dengan ion natrium masuk ke intrasel otot(depolarisasi). Proses depolarisasi akan diikuti oleh proses repolarisasi yang ditandai dengan keluarnya ion kalium ke ekstrasel otot.^{29,30}

Mekanisme molekuler kontraksi dan relaksasi otot rangka akibat sengatan listrik adalah sebagai berikut:

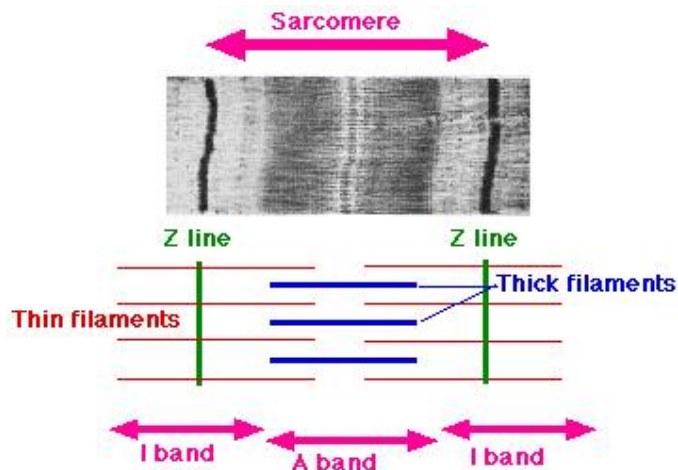
1. Proses dimulai dari pelepasan neurotransmitter asetilkolin oleh ujung saraf, kemudian asetilkolin akan ditangkap oleh reseptor asetilkolin pada sarkolema otot. Hal ini mengakibatkan timbulnya potensial aksi sepanjang sarkolema hingga ke tubulus. Potensial aksi tersebut merangsang ion kalsium untuk dilepaskan dari retikulum endoplasma. Ion kalsium berikatan dengan troponin sehingga merubah formasi troponin-tropomiosin yang membuka tempat aktif filamen aktin.
2. Bagian aktif aktin akan berikatan dengan jembatan penyeberangan filamen miosin. Ikatan antara kepala jembatan penyeberangan dan bagian aktif filamen aktin menyebabkan perubahan kedudukan kepala, yaitu kepala miring ke arah lengan jembatan penyeberangan. Kedudukan ini memberikan *power stroke* untuk menarik filamen aktin. Energi yang mengaktifkan *power stroke* adalah energi yang disimpan oleh perubahan bentuk pada kepala bila molekul ATP telah dipecah sebelumnya.
3. Sekali jembatan penyeberangan itu miring, keadaan ini menyebabkan pelepasan ADP dan Pi yang sebelumnya melekat pada kepala. Pada tempat pelepasan ADP, terikat molekul ATP yang baru. Ikatan ini kemudian menyebabkan terlepasnya kepala dari aktin.
4. Setelah kepala terpisah dari aktin, sebuah molekul ATP yang baru dipecah untuk memulai siklus baru yang menimbulkan *power stroke*, artinya energi sekali lagi menopang agar kepala kembali ke kedudukan tegak lurus dan siap untuk memulai siklus *power stroke* yang baru.



Gambar 1. Mekanisme ‘berjalan-jalan’ aktin-miosin dalam kontraksi otot.

Dikutip dari Guyton dan Hall ²⁹

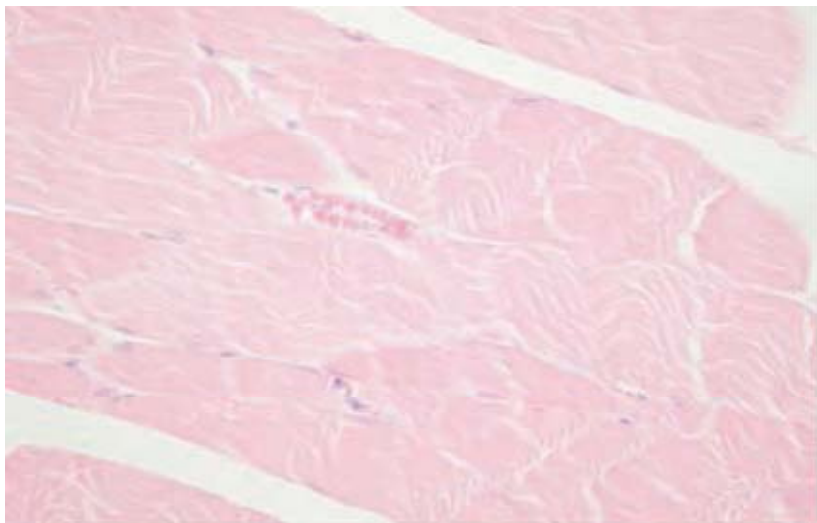
5. Pergeseran aktin-miosin selama kontraksi-relaksasi otot akan menyebabkan perubahan pada lebar lempeng Z yang satu dengan lempeng Z sebelahnya. Kekuatan mekanis yang menyebabkan pergeseran aktin miosin tersebut dibentuk oleh interaksi jembatan penyeberangan dari filamen miosin dengan filamen aktin. Dalam keadaan istirahat, kekuatan tersebut dihambat. ^{29,30,31,32}



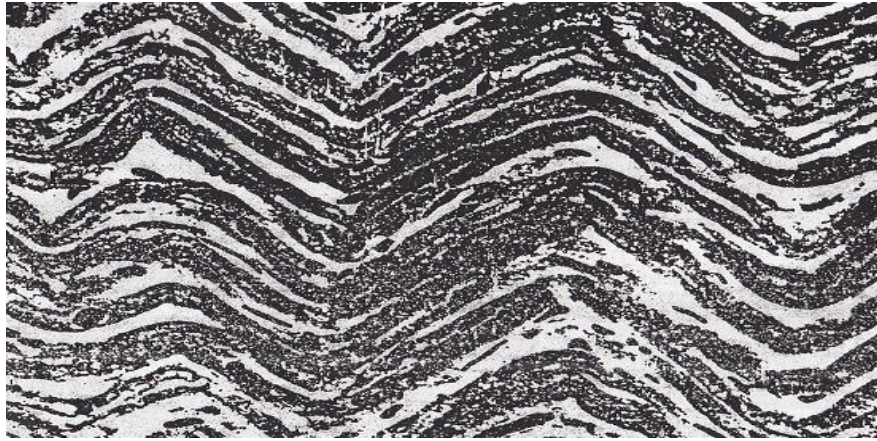
Gambar 2. Penyempitan antar pita Z selama proses kontraksi-relaksasi otot.

Dikutip dari John W. Kimball ³³

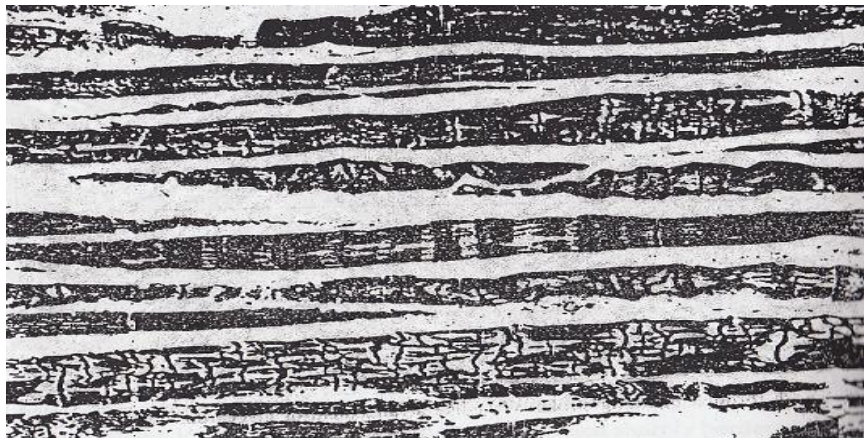
Gambaran tetani pada jaringan otot secara mikroskopis adalah serabut otot yang tampak bergelombang (hiperkontraksi), serabut otot terputus/ruptur, dan keluarnya eritrosit dari pembuluh darah (hiperemi). Penelitian dari Kilic S, sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S membuktikan bahwa dalam waktu 5 detik paparan listrik secara kontak langsung, semakin tinggi tegangan listrik yang diberikan maka semakin berat gambaran mikroskopis (hiperemi, nekrosis, ruptur).⁹ Syok listrik mengakibatkan kontraksi otot yang sangat kuat sehingga menimbulkan perdarahan serabut otot (Leibovici et al. 1995; Karger et al. 2002).⁷



Gambar 3. Hiperkontraksi serat otot paha tikus wistar
Dikutip dari Kilic S, sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S⁹



Gambar 4. Hiperkontraksi (*wave-like arrangement*) serat otot korban petir
Dikutip dari Janssen W³



Gambar 5. Hiperkontraksi serat otot tikus pada paparan listrik bolak balik.
Dikutip dari Janssen W³

2.3 Nekrosis Sel Otot

Listrik menyebabkan nekrosis sel otot melalui mekanisme panas (*joule heating*), elektroporasi, dan hiperkontraksi serat otot. Kerusakan sarkolema otot akibat kontraksi yang bersifat tetani menyebabkan materi-materi intraseluler keluar dari intrasel seperti mioglobin, enzim kreatin kinase, dll. Kerusakan sarkolema otot bisa juga terjadi pada keadaan iskemia, obat-obatan (alkohol, opiat, kokain, amfetamin, neuroleptik, ekstasi, trisiklik antidepressan), infeksi

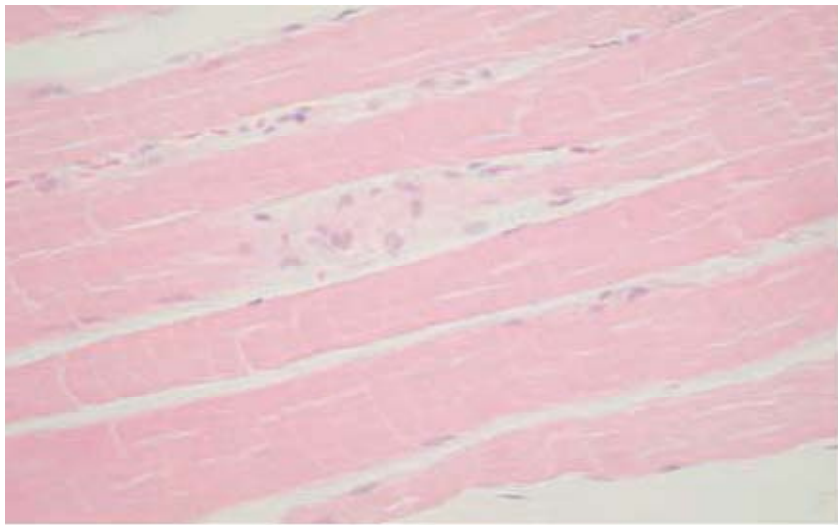
virus dan bakterial, toksin(toksin ular, serangga), polimiositis, miopati, hiper/hipotermia.^{7,26,27,28,34}

Membran sel yang mengalami cedera menyebabkan membran sel tidak mampu memompa ion natrium yang cukup, sehingga kenaikan konsentrasi natrium dalam sel menarik air masuk ke dalam sel. Sel membengkak dan sitoplasma menjadi pucat. Derajat yang ringan dari pembengkakan intraseluler disebut bengkak keruh. Penambahan yang lebih lanjut dari cairan dan pembengkakan organel menyebabkan terjadinya vakuola di dalam sitoplasma. Pengaruh yang cukup hebat atau berlangsung cukup lama menyebabkan sel akan mencapai titik dimana sel tidak dapat lagi dapat mengkompensasi dan tidak dapat melangsungkan metabolisme. Kematian sel atau jaringan pada organisme hidup disebut nekrosis, tidak terikat oleh penyebabnya.^{24,25}

Perubahan-perubahan lisis yang terjadi dalam jaringan nekrotik dapat melibatkan sitoplasma sel, namun intilah yang paling jelas menunjukkan perubahan-perubahan kematian sel. Inti sel yang mati akan melisut, batasnya tidak teratur, dan berwarna gelap dinamakan piknosis. Kemungkinan lain, inti dapat hancur, dan meninggalkan pecahan-pecahan zat kromatin yang tersebar di dalam sel. Proses ini disebut karioreksis. Akhirnya, pada beberapa keadaan, inti sel yang mati kehilangan kemampuan untuk diwarnai dan menghilang begitu saja, proses ini disebut kariolisis.^{24,25}

Sengatan listrik akan menyebabkan kontraksi serat otot rangka dan pemampatan pita Z (Z bands). Puschel dan Brinkmann (1979) mengatakan bahwa

arus listrik menimbulkan hiperkontraksi serat otot rangka dan agregasi trombosit intravaskuler. Selain itu Schmidt (1910), Viterbo dan Pasetti (1965), Mazzucchelli dan Andreuzzi (1966), Nevelos et. al (1967) membuktikan bahwa sengatan listrik menyebabkan pembengkakan mitokondria, kerusakan struktur aktin dan miosin, perdarahan dan robekan serat otot rangka.³



Gambar 6. Nekrosis sel otot paha tikus wistar.

Dikutip dari Kilic S, sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S⁹

2.4 Kreatin Kinase Serum

Kerusakan sel menyebabkan molekul-molekul intrasel termasuk enzim dapat keluar ke ekstrasel. Peningkatan kadar suatu enzim yang sangat berlebihan dalam serum atau plasma bisa menjadi petanda adanya kerusakan sel yang mengandung enzim tersebut, contohnya: peningkatan enzim kreatin kinase menunjukkan adanya kerusakan sel otot.^{24,26,34}

Kreatin kinase berukuran kecil (60.000 dalton) maka molekul kreatin kinase dapat keluar dari sel otak dan otot yang mengalami iskemia, cedera, atau peradangan sel. Kadar kreatin kinase dalam serum orang sehat bergantung pada

massa otot tubuh dan kebiasaan berolahraga. Seseorang yang kurus dan kurang bergerak memiliki kadar kreatin kinase serum 30-50 U/l, sedangkan seseorang yang terbiasa berolahraga secara rutin dan berotot tebal mempunyai kadar kreatin kinase 500-1000 U/l. Lebarnya rentang kadar kreatin kinase menimbulkan masalah dalam menentukan acuan untuk mengidentifikasi kerusakan organ berdasarkan nilai kreatin kinase dalam serum.^{24,26,34}

Keadaan berikut ini mempengaruhi kadar kreatin kinase dalam darah, yaitu: peningkatan lebih dari 5 kali kadar normal ditemukan pada penyakit distropi otot Duchene, polimiositis, dermatomiositis, dan infark miokardium. Peningkatan kadar kreatin kinase 2-4 kali kadar normal didapatkan pada keadaan olahraga berat, trauma, tindakan bedah, penyuntikan intramuskulus, delirium tremens, miopati alkoholik, cedera iskemia berat, infark paru, edema paru, hipotiroidisme pada beberapa pasien, dan psikosis agitatif akut.^{24,26,34}

Konsentrasi kreatin kinase serum total sangat meningkat setelah trauma otot rangka karena tersengat listrik, cedera mekanis, kejang, tetani, insisi bedah, atau penyuntikan intramuskulus.^{35,36} Kreatin kinase juga dapat meningkat pada kondisi hipertermia atau hipotermia, setelah persalinan per vaginam akibat kontraksi miometrium, serta sindrom Reye.^{24,26,34}

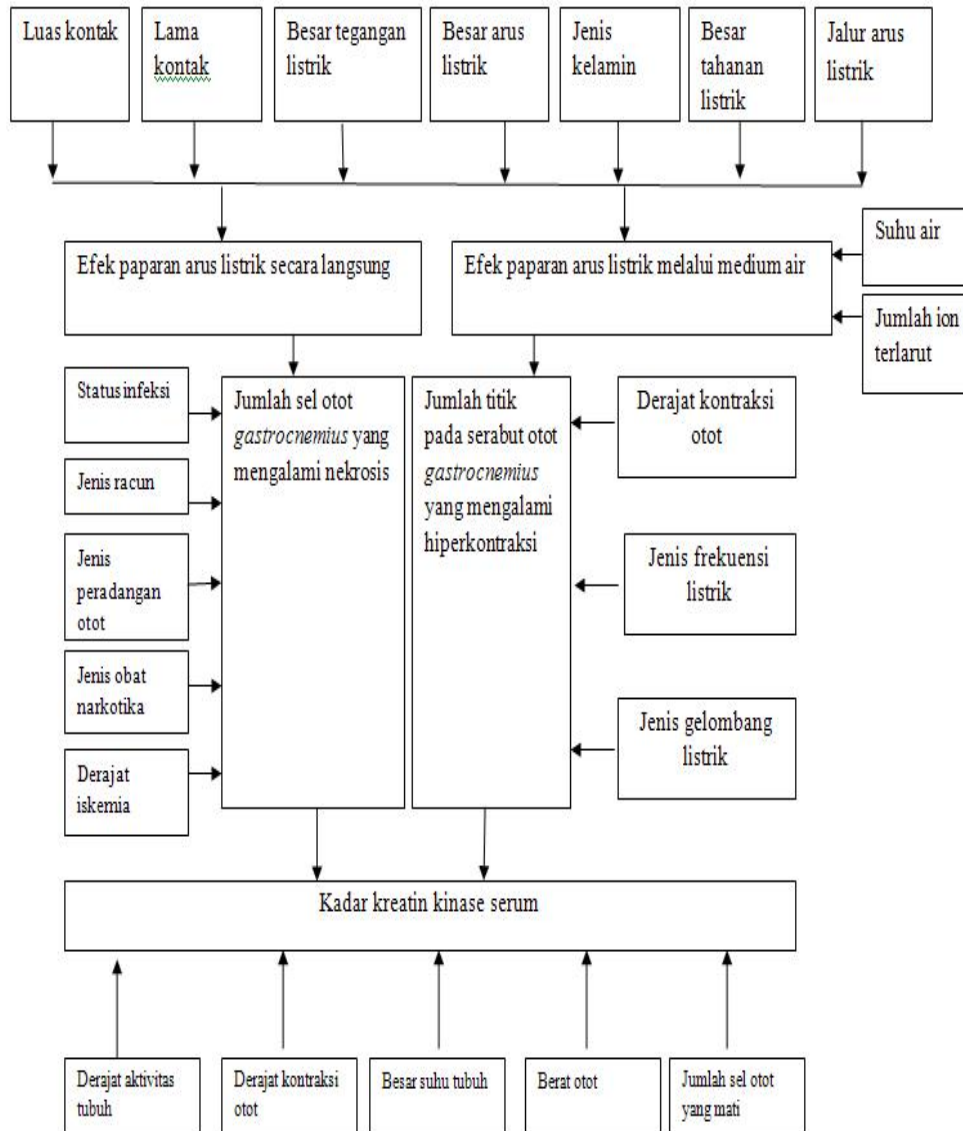
Kadar kreatin kinase tergantung dari faktor usia, jenis kelamin, berat otot, aktivitas fisik, kondisi iklim. Kadar kreatin kinase serum yang meningkat pada seseorang dewasa yang tampak sehat berhubungan dengan status aktivitas fisiknya. Aktivitas fisik yang berat pada kasus tersebut menyebabkan kerusakan

sarkomer sel-sel otot sehingga terjadi pelepasan kreatin kinase. Kadar kreatin kinase akan mencapai puncaknya hingga 24 jam setelah aktivitas, kemudian kadar kreatin kinase akan mengalami penurunan secara teratur hingga mencapai kadar normal.³⁷

BAB 3

KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS

3.1 KERANGKA TEORI



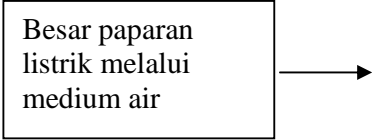
3.2 KERANGKA KONSEP

33
 Besar paparan listrik secara langsung

Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

Kadar kreatin kinase serum

Besar paparan listrik melalui medium air



3.3. HIPOTESIS

1. Terdapat korelasi positif antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar keratin kinase serum tikus wistar.
2. Terdapat korelasi positif antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum.
3. Terdapat perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik.
4. Terdapat perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan arus listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air.

BAB 4 METODE PENELITIAN

4.1. Ruang Lingkup Penelitian

4.1.1 Lingkup Tempat

Adaptasi tikus wistar, pembuatan blok parafin, dan pewarnaan/pegecatan jaringan dilakukan di Laboratorium Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam (F-MIPA) Universitas Semarang. Perlakuan paparan listrik, pengambilan sampel otot *gastrocnemius* dan darah tikus wistar dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang. Pembacaan preparat tersebut dilakukan di Laboratorium Patologi Anatomi Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro. Pemeriksaan kadar kreatin kinase dilakukan di Laboratorium CITO Jl. Indraprasta no. 81 Semarang.

4.1.2 Lingkup Waktu

Penelitian dilaksanakan selama 5 bulan, yaitu: Oktober 2009 - Februari 2010.

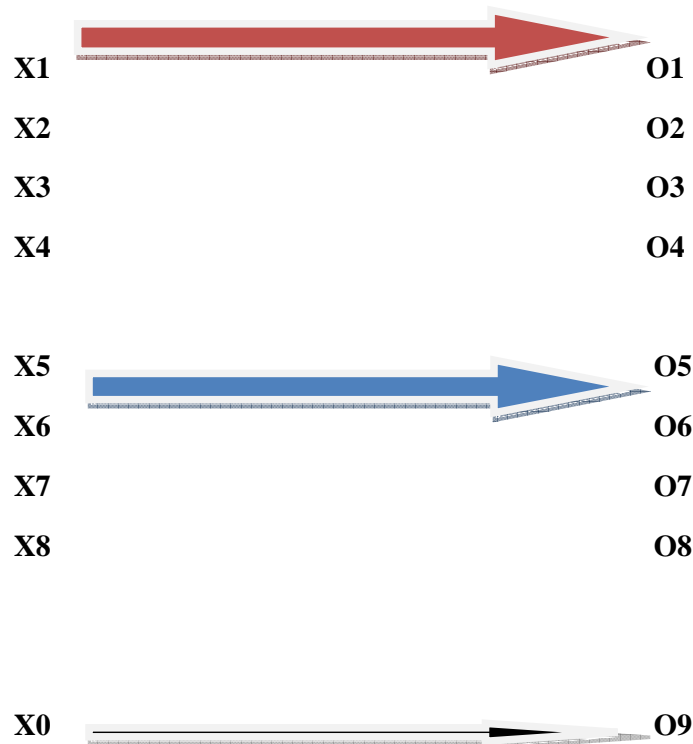
4.1.3 Lingkup Ilmu

Ilmu Kedokteran Forensik, Ilmu Patologi Anatomi, Ilmu Fisika.

4.2. Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorik dengan rancangan penelitian *Posttest Only Control group design* yang menggunakan binatang coba sebagai obyek percobaan.

Skema rancangan penelitian untuk menganalisis efek variasi dosis *prelethal* dan *lethal* paparan arus listrik secara langsung (X1, X2, X3, X4) dan melalui medium air (X5, X6, X7, X8) terhadap kerusakan otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase tikus wistar. Kelompok kontrol (X0) tidak mendapatkan paparan arus listrik.



Keterangan :

X1 : paparan arus listrik 1-30 mA secara langsung

X2 : paparan arus listrik 31-60 mA secara langsung

X3 : paparan arus listrik 61-90 mA secara langsung

X4 : paparan arus listrik 91-120 mA secara langsung

X5 : paparan arus listrik 1-30 mA melalui medium air

X6 : paparan arus listrik 31-60 mA melalui medium air

X7 : paparan arus listrik 61-90 mA melalui medium air

X8 : paparan arus listrik 91-120 mA melalui medium air

X0 : kontrol

Gambar 7. Skema rancangan penelitian paparan arus listrik pada tikus wistar

4.3. Populasi dan Sampel

4.3.1. Populasi

Populasi yang diteliti adalah tikus Wistar .

4.3.2. Sampel

4.3.2.1 Kriteria inklusi

- Tikus jenis Wistar jantan.
- Berat badan : 150-200 gram.
- Umur 3 – 4 bulan.
- Anatomi tampak normal.

4.3.2.2 Kriteria eksklusi

- Tikus sakit.
- Tikus mati sebelum mendapat perlakuan.

4.3.2.3 Besar Sampel

Berdasarkan rumus WHO maka besar sampel untuk setiap kelompok perlakuan pada penelitian ini adalah 6 ekor tikus wistar. Dengan demikian jumlah keseluruhan sampel adalah 48 ekor tikus wistar untuk kelompok perlakuan dan 6 ekor tikus wistar untuk kelompok kontrol.

4.3.2.4 Cara Pengambilan Sampel

Untuk menghindari bias karena faktor variasi umur dan berat badan maka pengambilan sampel dilakukan secara acak sederhana (*simple random sampling*). Randomisasi langsung dapat dilakukan karena sampel diambil dari tikus *Wistar* yang sudah memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi sehingga dianggap cukup homogen. Semuanya diambil dari secara acak dari kelompok tikus yang sudah diadaptasi pakan selama 1 minggu.

4.4 Variabel Penelitian

4.4.1 Variabel Bebas.

- Arus listrik bertingkat.

Skala : ordinal.

4.4.2 Variabel Antara

- Nekrosis otot *gastrocnemius*.

Skala : rasio

- Titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*.

Skala : rasio

4.4.3 Variabel Tergantung

- Kreatin kinase.

Skala : rasio

4.5 Definisi Operasional

4.5.1 Arus listrik bertingkat

Arus listrik bertingkat adalah besar arus listrik dosis *prelethal* dan dosis *lethal* yang digunakan untuk perlakuan paparan listrik, yaitu: 1-30 mA, 31-60 mA, 61-90 mA, dan 91-120 mA.

Skala : ordinal.

Satuan arus listrik : miliamper.

4.5.2 Nekrosis otot *gastrocnemius*

Nekrosis otot *gastrocnemius* adalah jumlah sel otot *gastrocnemius* yang mengalami piknosis, karioreksis atau kariolisis inti sel yang tampak dari lima lapangan pandang dalam satu preparat di bawah mikroskop cahaya Olympus BX 41 dengan pembesaran 400x.

Skala : rasio

Satuan jumlah nekrosis : buah

4.5.3 Titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* adalah jumlah puncak gelombang hiperkontraksi serabut otot yang dibentuk oleh sekelompok sarkomer yang memendek yang tampak dari lima lapangan pandang dalam satu preparat di bawah mikroskop cahaya Olympus BX 41 dengan pembesaran 400x.

Skala : rasio

Satuan jumlah titik hiperkontraksi : buah

4.5.4 Kadar kreatin kinase

Kadar kreatin kinase adalah kadar kreatin kinase serum darah tikus wistar yang diperiksa dengan alat *COBAS Integral 400 Plus-Roche*.

Skala : rasio

Satuan : U/L

4.6 Alat dan Bahan

4.6.1 Alat

4.6.1.1 Alat untuk paparan listrik

- Rangkaian listrik Perusahaan Listrik Negara (PLN) dihubungkan dengan suplai (regulator).
- Wadah dari kaca.

4.6.1.2 Alat untuk pemeriksaan histopatologis

- Pisau skalpel.
- Pinset bedah.
- Gunting.
- Mikroskop.
- Object glass.
- Kamera digital.

4.6.1.3 Alat untuk pemeriksaan kreatin kinase

- *COBAS Integra 400 Plus-Roche.*

4.6.2 Bahan

Bahan-bahan untuk percobaan ini :

1. Air sumur artesis
2. Tikus Wistar.
3. Asam pikrat.
4. Spidol.
5. Bahan-bahan untuk pembuatan blok parafin.
 - Larutan bufer formalin 10 %.
 - Parafin.
 - Larutan xylol.
 - Alkohol bertingkat 30 %, 40 %, 50 %, 70 %, 80 %, 90 %, 96 %

4.7 Prosedur Pengumpulan Data

1. Melakukan adaptasi terhadap 54 ekor tikus wistar jantan selama 7 hari di laboratorium dengan kandang tunggal dan diberi pakan standar serta minum secukupnya.
2. Pada hari ke-8, membagi tikus wistar menjadi 9 kelompok yang masing – masing terdiri dari 6 ekor tikus wistar yang dipilih secara acak. Setiap kelompok tikus wistar diberi tanda dengan asam pikrat pada daerah yang berbeda yaitu kepala, punggung, ekor, dan kaki. Selanjutnya menimbang berat badan masing - masing tikus.
3. Memberikan paparan arus listrik secara langsung selama 60 detik pada kelompok 1, 2, 3, dan 4 dengan cara menjepitkan ujung konduktor (listrik

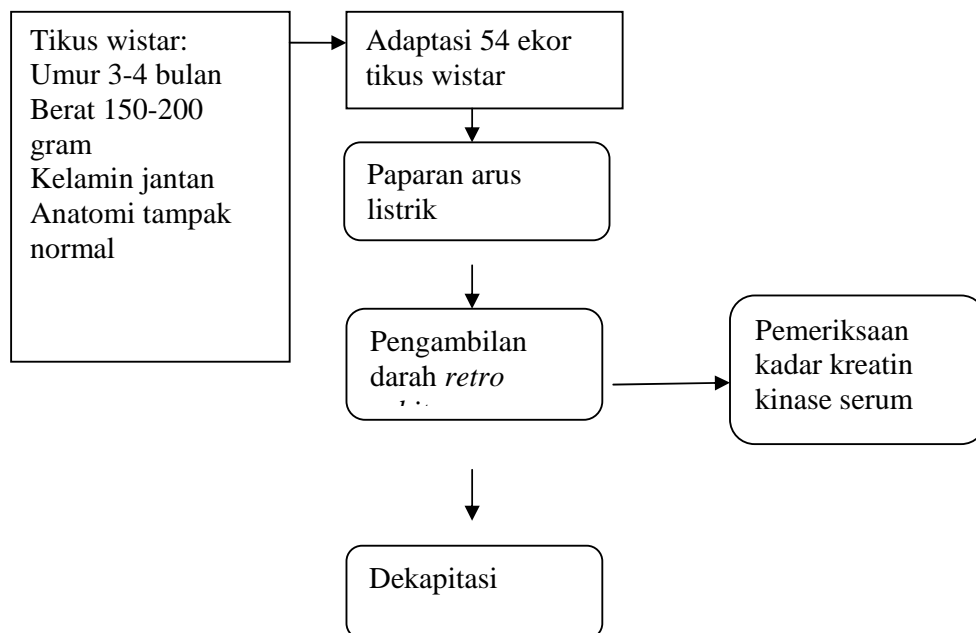
masuk) pada telapak kaki kiri depan tikus wistar dan ujung konduktor lainnya (listrik keluar) di telapak kaki kanan belakang tikus wistar. Kelompok 1 mendapatkan paparan arus listrik 1-30 mA, kelompok 2 mendapatkan paparan arus listrik 31-60 mA, kelompok 3 mendapatkan paparan arus listrik 61-90 mA, kelompok 4 mendapatkan paparan arus listrik 91-120 mA.

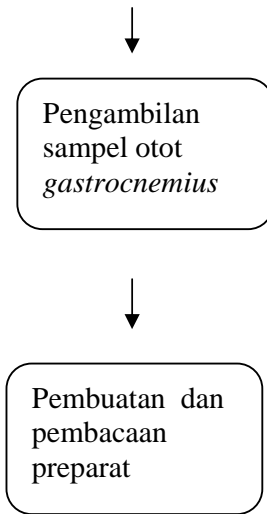
4. Memberikan paparan arus listrik melalui medium air selama 60 detik pada kelompok 5, 6, 7, dan 8 dengan cara mencelupkan ujung konduktor ke dalam wadah kaca/aquarium berukuran 20,5 x 19,5 x 14,5 sentimeter yang diisi air sumur artesis sebanyak 0,5 liter. Kelompok 5 mendapatkan paparan arus listrik 1-30 mA, kelompok 6 mendapatkan paparan arus listrik 31-60 mA, kelompok 7 mendapatkan paparan arus listrik 61-90 mA, kelompok 8 mendapatkan paparan arus listrik 91-120 mA.
5. Kelompok kontrol (kelompok 9) tidak mendapatkan paparan arus listrik.
6. Melakukan pengambilan darah sebanyak 2 mililiter dari pembuluh darah *retro orbita* tikus wistar yang telah mendapatkan paparan arus listrik maupun tikus wistar yang menjadi kontrol, kemudian darah tersebut dimasukkan ke dalam tabung dan selanjutnya dikirim ke Laboratorium CITO Jl. Indraprasta no.81 Semarang. Sampel darah diperiksa dengan menggunakan *COBAS integra 400 Plus-Roche*.
7. Mematikan hewan coba yang belum mati dengan cara *dekapitasi* leher.
8. Membuat irisan pada kulit betis ekstremitas tikus wistar dengan menggunakan pisau. Memisahkan otot dari lapisan kulit dan jaringan

subkutan di atasnya. Kemudian mengambil $\frac{1}{2}$ otot *gastrocnemius* bagian bawah (*distal*). Sampel otot tersebut diletakkan pada tabung berisi cairan pengawet bufer formalin 10% dengan perbandingan 1 bagian otot dan 9 bagian bufer formalin 10 %.

- Meletakkan tabung berisi sampel otot *gastrocnemius* tikus wistar ke rak tabung kemudian diserahkan ke analis guna mengolahnya mengikuti metode baku histologi dengan pewarnaan *Hematoxylin-Eosin*. Dari setiap sampel otot dibuat preparat dengan potongan *longitudinal*. Preparat tersebut akan dibaca oleh seorang dokter spesialis patologi anatomi dan peneliti. Pembacaan preparat dalam lima lapangan pandang dengan perbesaran 400x. Sasaran yang dibaca adalah jumlah sel-sel otot *gastrocnemius* ekstremitas tikus wistar yang mengalami nekrosis dan jumlah titik-titik hiperkontraksi pada serabut-serabut otot *gastrocnemius*. Data pemeriksaan dicatat dalam formulir untuk kemudian dianalisa.

4.8 Alur Kerja Penelitian





4.9 Pengolahan dan Analisis Data

Setelah data terkumpul dilakukan *editing, coding, entry* untuk kemudian dianalisis secara deskriptif maupun analitik. Pengolahan dan analisis data dilakukan dengan menggunakan program komputer *SPSS 11.5 for windows*. Analisis data didahului dengan analisis deskriptif berupa rerata dan simbang baku kadar kreatin kinase serum dan jumlah nekrosis sel otot *gastrocnemius* serta jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* yang ditampilkan dalam bentuk tabel. *Uji korelasi Spearman* digunakan untuk menganalisis korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah nekrosis sel otot dan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*, dan menganalisis korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum. *Uji korelasi Pearson* digunakan untuk menganalisis korelasi antara jumlah nekrosis

dan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum.^{39,40}

Uji *One-Way ANOVA* digunakan untuk menganalisis perbedaan jumlah nekrosis dan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar. Uji t-tidak berpasangan (*independent t-test*) digunakan untuk menganalisis perbedaan jumlah nekrosis sel otot dan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* serta kadar kreatin kinase serum tikus wistar antara kelompok yang terpapar arus listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air. Nilai probabilitas (p) adalah kurang dari 0,05 dan interval kepercayaan 95%.^{39,40}

BAB 5

HASIL PENELITIAN

5.6 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dan melalui medium air terhadap jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini :

Tabel 3. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Besarnya dosis arus listrik	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	
	Secara langsung Rerata (simpang baku)	Melalui medium air Rerata (simpang baku)
kontrol	40,67 (9,85)	40,67 (9,85)
1-30 mA	300,33 (91,33)	477,17 (43,89)

31-60 mA	455,83 (69,65)	802,00 (93,67)
61-90 mA	716,17 (115,98)	1145,00 (418,38)
91-120 mA	1058,17 (243,26)	1353,83 (257,51)
<i>rho</i>	0,959	0,910
<i>p</i> *	0,000	0,000

*uji korelasi Spearman

5.7 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum

Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dan melalui medium air dengan kadar kreatin kinase serum dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini :

Tabel 4. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum

Besarnya dosis arus listrik	Kadar kreatin kinase serum	
	Secara langsung Rerata (simpang baku)	Melalui medium air Rerata (simpang baku)
kontrol	533,33 (108,6)	533,33 (108,6)
1-30 mA	834,83 (522,35)	818,33 (373,66)
31-60 mA	1287,83 (496,77)	1003,00 (415,36)
61-90 mA	1362,33 (758,66)	1210,00 (545,52)
91-120 mA	1552,83 (696,25)	1588,17 (498,15)
<i>rho</i>	0,632	0,701
<i>p</i> *	0,000	0,000

*uji korelasi Spearman

5.8 Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum

Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini :

Tabel 5. Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum

Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	Kadar kreatin kinase serum		
	Rerata (simpang baku)	<i>rho</i>	<i>p</i> *
Secara langsung	1259,46 (644,77)	0,320	0,127
Melalui medium air	1154,88 (521,37)	0,305	0,147

*uji korelasi Pearson

5.9 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar

Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan listrik secara langsung dan melalui medium air dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini:

Tabel 6. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan listrik secara langsung

Jenis Ekstremitas	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> berdasarkan dosis paparan arus listrik secara langsung			
	1-30 mA	31-60 mA	61-90 mA	91-120 mA
	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)
Kiri depan	110,17 (55,44)	126,17 (29,86)	224,00 (74,81)	374,67(120,03)
Kanan depan	51,00 (28,69)	97,67 (38,62)	134,00 (32,00)	217,50 (68,53)
Kanan belakang	83,33 (26,82)	122,67 (52,64)	191,83 (76,53)	259,33 (79,22)

Kiri belakang	56,83 (24,37)	109,33 (23,35)	166,33 (16,62)	206,67 (62,59)
F hitung	4,328	0,708	1,885	4,837
p^*	0,017	0,558	0,165	0,011

**ANOVA*

Tabel 7. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan listrik melalui medium air

Jenis Ekstremitas	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> berdasarkan besar paparan arus listrik melalui medium air			
	1-30 mA	31-60 mA	61-90 mA	91-120 mA
	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)	Rerata (simpang baku)
Kiri depan	103,33 (37,73)	205,17 (54,32)	268,33 (138,99)	342,00 (106,86)
Kanan depan	135,83 (50,19)	197,50 (58,55)	318,67 (105,32)	313,00 (55,69)
Kanan belakang	119,50 (48,77)	193,50 (62,98)	269,50 (107,87)	322,00 (67,54)
Kiri belakang	118,50 (29,57)	205,83 (43,67)	288,50 (96,39)	376,83 (114,52)
F hitung	0,558	0,071	0,258	0,597
p^*	0,630	0,975	0,855	0,624

*ANOVA

5.10 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum antara paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum antara paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini :

Tabel 8. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Jenis paparan listrik	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i> berdasarkan besar paparan arus listrik			
	1-30 mA Rerata (simpang baku)	31-60 mA Rerata (simpang baku)	61-90 mA Rerata (simpang baku)	91-120 mA Rerata (simpang baku)
Secara langsung	300,33 (91,33)	455,83 (69,65)	716,17 (115,98)	1058,17 (243,26)
Melalui medium air	472,17 (43,89)	802,00 (93,67)	1145,00 (414,38)	1353,83 (257,51)
<i>p</i> *	0,02*	0,000*	0,052*	0,068*

*Uji t- tidak berpasangan

Tabel 9. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Jenis paparan listrik	Kadar kreatin kinase serum berdasarkan besar paparan arus listrik			
	1-30 mA Rerata (simpang baku)	31-60 mA Rerata (simpang baku)	61-90 mA Rerata (simpang baku)	91-120 mA Rerata (simpang baku)
Secara langsung	834,83 (522,35)	1287,83(496,77)	1362,33 (758,06)	1552,83 (696,25)
Melalui medium air	818,33 (373,66)	1003,00 (415,36)	1210,00 (545,52)	1588,17 (498,15)
<i>p</i> *	0,951*	0,307*	0,698*	0,921*

*Uji t- tidak berpasangan

BAB 6

PEMBAHASAN

6.1 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat korelasi bermakna antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dan melalui medium air dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*. Hal ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa arus listrik bolak balik (*alternating current*) menyebabkan kontraksi otot yang bersifat tetani antara 40-110 kali per detik. Kontraksi tetani tersebut memungkinkan korban akan menggenggam konduktor secara terus menerus sehingga semakin memperparah keadaan korban.¹⁶ Aliran listrik rumah tangga mempunyai frekuensi 50 Hertz. Frekwensi ini mempunyai efek merangsang saraf dan otot sehingga terjadi kontraksi otot.^{14,15}

Penelitian lain pada tikus yang dilakukan oleh Kilic S, sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S menemukan adanya gambaran *contracted*, ruptur serabut otot paha, hiperemi, dan nekrosis pada sel otot paha setelah paparan arus listrik bolak balik secara langsung selama 5 detik.⁹ Sengatan listrik akan menyebabkan kontraksi serat otot rangka dan pemampatan pita Z (Z bands). Puschel dan Brinkmann (1979) mengatakan bahwa arus listrik menimbulkan hiperkontraksi serat otot rangka dan agregasi trombosit intravaskuler.³

Otot merupakan jaringan tubuh yang memiliki kelistrikan sendiri dan dapat dirangsang (*excitable cells*) oleh rangsang kimia dan fisika dari luar. Otot dan saraf adalah jaringan tubuh yang paling rentan dari pengaruh sengatan listrik. Jaringan otot yang dilalui arus listrik akan mengalami kerusakan yang dapat pulih (*reversible*) maupun tidak dapat pulih (*irreversible*) melalui mekanisme elektroporasi, panas (*joule heating*), hiperkontraksi dan ruptur serabut-serabut otot.^{6,7,8}

Semakin besar arus listrik yang memasuki tubuh maka semakin parah kerusakan organ dalam. Jumlah arus listrik yang memasuki tubuh dipengaruhi oleh variabel-variabel elektrofisik, yaitu: besar tegangan listrik, besar tahanan jaringan tubuh, lama kontak dan luas kontak dengan listrik, medium air (kadar elektrolit dan suhu air) yang dilalui arus listrik.^{1,2,6,17}

Otot rangka merupakan jaringan yang membawa arus listrik paling besar karena otot rangka memiliki proporsi volum yang paling besar dibandingkan jaringan lainnya.¹⁷

Penelitian ini tidak menemukan gambaran nekrosis sel otot gastrocnemius setelah paparan arus listrik. Hal ini karena proses terjadinya nekrosis memerlukan waktu beberapa jam bahkan beberapa hari setelah sengatan listrik. Sementara itu, pada penelitian ini sampel otot diperiksa segera setelah sengatan listrik.

6.2 Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum

Hasil penelitian ini menunjukkan terdapat korelasi bermakna antara paparan arus listrik dosis bertingkat dengan kadar kreatin kinase serum. Hasil penelitian ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa kerusakan organ-organ tubuh ditentukan oleh jumlah arus listrik yang melewati organ tubuh tersebut.^{14,16} Kerusakan otot rangka menyebabkan materi-materi intrasel, misalnya : kreatin kinase, mioglobin, ion kalium, dll dilepaskan ke sirkulasi darah.^{6,7,8}

Penelitian ini melakukan penilain kadar kreatin kinase serum tikus wistar segera setelah tikus wistar mendapatkan trauma sengatan listrik, sehingga nilai yang ada belum menunjukkan kadar puncak kreatin kinase serum. Puncak kadar kreatin kinase serum akan dijumpai hingga 24 jam setelah terjadi trauma yang mengenai otot.^{34,37} Konsentrasi kreatin kinase serum total sangat meningkat setelah trauma otot rangka karena tersengat listrik, cedera mekanis, kejang, tetani, insisi bedah, atau penyuntikan intramuskulus.^{24,26,34}

6.3 Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum

Hasil penelitian ini menunjukkan tidak terdapat korelasi yang bermakna antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum. Hal ini sesuai dengan teori bahwa pada kasus sengatan listrik, kreatin kinase tidak hanya dilepaskan ke sirkulasi darah oleh kerusakan sarkomer ketika terjadi hiperkontraksi sel otot, namun juga oleh peristiwa elektroporasi, denaturasi protein, dan ruptur serabut otot, serta nekrosis sel otot.^{7,9,22}

Faktor-faktor lainnya yang berpengaruh pada kadar kreatin kinase serum adalah usia, jenis kelamin, berat otot, aktivitas fisik, kondisi iklim, genetik, gangguan metabolik, trauma langsung dan tidak langsung pada otot, sindrom panas, latihan yang berlebihan, obat-obatan tertentu dan racun, trombosis pembuluh darah, embolus, iskemia, durasi dan intensitas aktivitas latihan. Tingkat kerusakan otot berkaitan dengan durasi dan intensitas aktivitas, dehidrasi, *fatigue*, infeksi virus, insufisiensi ginjal.^{8,37}

6.4 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi otot *gastrocnemius* antar ekstremitas tikus wistar

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan rerata jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas setelah paparan listrik melalui medium air. Hal ini sesuai dengan teori bahwa sengatan listrik melalui medium air memiliki karakteristik, yaitu : tempat listrik masuk dan keluar pada permukaan tubuh korban tidak jelas.^{1,2} Elektron-elektron (arus listrik) akan diangkut oleh ion-ion terlarut di dalam air, sehingga elektron-elektron tersebut dapat memasuki tubuh korban melalui area yang luas.¹⁸

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan rerata jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas akibat paparan arus listrik secara langsung 1-30 mA, 31-60 mA, 61-90 mA. Peneliti mengamati bahwa tikus wistar masih memiliki kemampuan secara sadar untuk berusaha melepaskan diri dari kontak dengan konduktor berarus listrik 1-30 mA, 31-60 mA, dan 61-90 mA. Hal ini tentunya bertolak belakang dengan teori *let go current* pada manusia yang mengatakan bahwa manusia secara sadar dapat

melepaskan diri dari kontak dengan listrik pada arus kurang dari 17 mA.^{1,14} Peneliti membuktikan bahwa pada dosis-dosis *prelethal*, tikus wistar berusaha melepaskan anggota gerakanya dari sumber sengatan listrik, sehingga arus listrik dapat memasuki semua ekstremitas. Hal ini menyulitkan pembuktian jejas sengatan listrik pada ekstremitas *point of contact* dan *point of grounded* listrik serta ekstremitas lain.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan terdapat perbedaan rerata jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas setelah paparan arus listrik 91-120 mA. Peneliti mengamati bahwa tikus wistar tidak mampu melepaskan diri dari paparan listrik 91-120 mA, sehingga efek sengatan listrik pada tiap-tiap ekstremitas dapat diamati. Teori yang berkembang sekarang ini mengatakan bahwa arus listrik terkonsentrasi pada daerah listrik masuk dan keluar, sehingga kerusakan jaringan terbanyak didapatkan pada daerah tersebut.¹⁶

Jejas sengatan listrik pada tubuh korban tergantung dari jalur yang dilewati arus listrik, khususnya tempat listrik masuk dan keluar mengingat pada tempat tersebut ditemukan kepadatan tertinggi arus listrik.^{16,17}

6.5 Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum antara paparan listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan rerata yang bermakna jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antara paparan listrik secara langsung dan melalui medium air. Pada penelitian ini rerata jumlah

titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan listrik melalui medium air lebih tinggi daripada rerata jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan listrik secara langsung. Hal ini mendukung teori yang mengatakan bahwa sengatan listrik secara kontak langsung dengan konduktor menyebabkan luka bakar sehingga terjadi proses karbonisasi (pengarangan) permukaan tubuh korban. Tahanan permukaan tubuh terhadap arus listrik akan meningkat akibat peristiwa karbonisasi tersebut, sehingga mengurangi jumlah arus yang memasuki tubuh.²⁷ Penelitian ini membuktikan teori tersebut bahwa sengatan listrik 90-120 mA selama 50-60 detik telah menimbulkan karbonisasi yang luas dan dalam pada ekstremitas yang kontak dengan konduktor. Pencatatan arus listrik pada komputer menunjukkan bahwa tidak ada arus listrik yang mengalir di tubuh tikus wistar selama sengatan listrik 91-120 mA pada detik di atas 50.

Karakteristik sengatan listrik di air adalah arus listrik memasuki medium air sebelum memasuki permukaan tubuh korban, sehingga *point of contact* listrik lebih luas dan tidak khas dibandingkan sengatan listrik secara kontak langsung dengan konduktor. Pergerakan arus listrik telah terpengaruh oleh kadar ion-ion terlarut, suhu air yang dilewatinya. Efek arus listrik ke tubuh korban kemungkinan lebih parah atau sebaliknya.^{1,2,18}

Hasil penelitian ini juga menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang bermakna kadar kreatin kinase serum tikus wistar yang terpapar arus listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air. Hal ini bertolak belakang dengan teori yang mengatakan bahwa sengatan listrik di air juga menyebabkan

kejadian asfiksi oleh proses masuknya air ke dalam saluran pernafasan (*drowning*) di air. Kejadian asfiksi juga menyebabkan cedera seluler, sehingga kejadian tersebut menjadi *co-incidence* cedera seluler akibat sengatan listrik.^{1,2,4} Penelitian ini mendapatkan hasil yang berbeda karena sampel darah segera diambil setelah paparan listrik, sehingga kadar kreatin kinase serum yang ada belum menunjukkan kadar puncaknya.

Sengatan listrik tegangan rendah mampu merusak struktur membran sel otot secara berangsur-angsur, sehingga pelepasan molekul-molekul intrasel ke sirkulasi darah berlangsung lambat. Hal ini mengakibatkan komplikasi-komplikasi lanjut sengatan listrik berupa penyakit ginjal, jantung, otak.^{7,19,38}

BAB 7

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

1. Terdapat korelasi positif antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dan melalui medium air dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dan kadar kreatin kinase serum tikus wistar
2. Tidak terdapat korelasi yang bermakna antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* dengan kadar kreatin kinase serum
3. Tidak terdapat perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antar ekstremitas setelah paparan arus listrik melalui medium air

4. Terdapat perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* antara ekstremitas *point of contact* listrik dengan ekstremitas lainnya setelah setelah paparan arus listrik 91-120 mA.
5. Terdapat perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* yang terpapar arus listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air.
6. Tidak terdapat perbedaan yang bermakna kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air.

7.2 Saran

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk membuktikan derajat kerusakan organ tubuh akibat sengatan listrik dengan durasi kontak yang berbeda-beda.
2. Diperlukan penelitian tentang korelasi antara lama waktu kematian dengan kadar kreatin kinase serum untuk menyingkirkan faktor lama kematian somatis (*postmortem interval*) terhadap peningkatan kadar kreatin kinase serum ketika menegakkan diagnosa sengatan listrik
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menganalisis batas *let go current* dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.

4. Adaptasi tikus wistar seharusnya dilakukan dilokasi yang menjadi tempat perlakuan paparan listrik.
5. Kadar kreatin kinase serum dan gambaran histopatologis otot *gastrocnemius* ekstremitas dapat dipergunakan sebagai indikator telah terjadi sengatan listrik, sedangkan penggunaannya pada manusia masih dibutuhkan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dimaio VJ, Dimaio D. Forensic pathology. 2nd ed. London: CRC Press; 2001.
2. Shepherd R. Simpson's forensic medicine. 12 th ed. London: Arnold;2003.
3. Janssen W. Forensic histopathology. Berlin : Springer-Verlag;1984.
4. Bockholdt B , Schneider V. Death by electrocution in bathtub. Available from: URL.: <http://www.medline.ru/public/sudm/a2/art3-2-2.phtml>
5. Budi S, Zulhasmar S, Tjetjep DS. Peranan ilmu forensik dalam penegakan hukum. Jakarta: Pustaka Dwipar; 2003.
6. Memon AR, Tahir SM, Memon FM, Hashmi F, Shaikh BF. Serum creatine phosphokinase as prognostic indicator in the management of electrical Burn. Journal of the College of Physicians and Surgeons Pakistan 2008;18:201-4.
7. Bikson M. A review of hazards association with exposure to low voltages. Available from: URL: <http://bme.cuny.cuny.edu/faculty/mbikson/BiksonMSafeVoltageReview.pdf>
8. Criner JA, Appelt M, Coker C, Conrad S, Holliday J. Rhabdomyolysis : the hidden killer. MEDSURG Nursing 2002;11: 138-55.
9. Kilic S, sozuer EM, Deniz K, Saraymen R, Avsarogullari L, Ozkan S. Correlation of serum procalcitonin and creatine phospo-kinase levels with tissue histopathology in rats exposed to experimental electric injury. Erciyes Medical Journal 2007;29:18-24.
10. Qin ZQ, Gong YC, Huang XH. Ultrastructure changes of electrical injury in rats. Fa Yi Xue Za Zhi Journal 2001;17:142-4.
11. Wang XW, Jin RX, Bartle EJ, Davies JW. Creatinine phosphokinase values in electrical and thermal burns. Thermal Injury Journal 1987;13:309-12.
12. Michiue T, Ishikawa T, Zhao D, Kamikodai Y, Zhu B, Maeda H. Pathological and biochemical analysis of the pathophysiology of fatal electrocution in five autopsy cases. Legal Medicine 2009;11:549-52.
13. Ahrenholz DH, Schubert W, Solem LD. Creatine kinase as a prognostic indicator in electrical injury. [Surgery](#) 1988;104:741-7.
14. Gabriel JF. Fisika kedokteran. Jakarta : EGC;1996
15. Malvino AV. Prinsip-prinsip elektronika. Edisi 1. Alih bahasa: Santoso AJ. Jakarta : Salemba Tehnika; 2003
16. Martinez JA, Nguyen T. Electrical injuries. Southern Medical Journal 2000;93:1165-8.
17. Lee RC, Zhang D, Hannig J. Biophysical injury mechanisms in electrical shock trauma. Annu Rev Biomed Eng 2000; 02: 477-509.
18. Lenntech. Water conductivity. Available from: URL: <http://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>
19. Duff K, McCaffrey RJ. Electrical injury and lightning injury: a review of their mechanisms and neuropsychological, psychiatric, and neurological sequelae. Neuropsychology Review 2001;11: 101-16.

20. Akcan R, Hilal A, Gulmen MK, Cekin N. Childhood deaths due to electrocution in Adana, Turkey. *Acta Paediatrica* 2007;96:443-5.
21. Byard RW, Hanson KA, Gilbert JD, James RA, Nadeau J, Blackburne B, Krous HF. Death due to electrocution in childhood and early adolescence. *Paediatr Child Health Journal* 2003;39:46-8.
22. Song TY. Electroporation of cell membranes. *Biophys Journal* 1991;60:297-306
23. Membrane Advance Learner Page. Available from: URL: <http://life.nthu.edu.tw/~d857401/advance.html>
24. Price SA, Wilson LM. Fisiologi proses-proses –penyakit. Edisi 4. Alih Bahasa : Anugerah P. Jakarta : EGC; 1995
25. Underwood JCE. Patologi umum dan sistemik. Edisi 2. Sarjadi, editor. Jakarta : EGC;1999
26. Baron DN. Kapitas selekta patologi klinik. Edisi 4. Alih Bahasa : Adrianto P, Gunawan J. Jakarta :EGC; 1992
27. Cooper MA, Price TG. Electrical and lightning injuries. Available from: URL: <http://www.uic.edu/labs/lightninginjury/Electr%26Ltn.pdf>
28. Dzhokic G, Jovchevska J, Dika A. Electrical Injuries: etiology, pathophysiology and mechanism. *Macedonian Journal of Medical Sciences* 2008;1: 54-8
29. Guyton AC, Hall JE. Buku ajar fisiologi kedokteran. Setiawan I, editor . Edisi 9. Penerjemah: Setiawan I, Tengadi KA, Santoso A. Jakarta: EGC;1997
30. Ganong WF. Buku ajar fisiologi kedokteran. Oswari J, editor. Edisi 14. Penerjemah : Andrianto P. Jakarta : EGC; 1995
31. Matthews GG. The mechanism of filament sliding during contraction of a myofibril. Available from: URL: <http://www.blackwellpublishing.com/matthews/myosin.html>
32. Muscle Contraction. Wikipedia, the free encyclopedia. Available from: URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Muscle_contraction
33. Human physiology. Available from: URL: <http://people.eku.edu/ritchisong/RITCHISO/301notes3.htm>
34. Widmann FK. Tinjauan klinis atas hasil laboratorium. Edisi 9. Penerjemah : Kresno SB, Gandasoebrata R, Latu J. Jakarata: EGC;2000
35. Arts MP, Nieborg A, Brand R, Peul WC. Serum creatine phosphokinase as an indicator of muscle injury after various spinal and nonspinal surgical procedures. *J Neurosurg Spine* 2007; 7: 282-6.
36. Louthrenoo W, Weerayutwattana N, Lertprasertsuke N, Sukitawut W. Serum muscle enzymes, muscle pathology and clinical muscle weakness: correlation in Thai patients with polymyositis/dermatomyositis. *J Med Assoc Thai* 2002;85:26-32.
37. Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM. Creatine kinase monitoring in sport medicine. *Br Med Bull* 2007; 81-82: 209-30.

38. Spies C, Trohman RG. Narrative review: electrocution and life-threatening electrical injuries. *Ann Intern Med* 2006;145:531-37.
39. Kirkwood BR. *Essentials of medical statistics*. London : Blackwell Scientific Publications; 1989.
40. Sopiudin Dahlan. *Statistik untuk kedokteran dan kesehatan*. Edisi 3. Jakarta : Salemba Medika; 2008.

Lampiran : Uji Korelasi Pearson

1. Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius dengan kadar kreatin kinase serum pada paparan listrik secara langsung

Correlations

		jumlah titik hiperkontraksi otot gastrocnemius	kadar kreatin kinase serum
jumlah titik hiperkontraksi otot gastrocnemius	Pearson Correlation	1	.320
	Sig. (2-tailed)	.	.127
	N	24	24
kadar kreatin kinase serum	Pearson Correlation	.320	1
	Sig. (2-tailed)	.127	.
	N	24	24

2. Korelasi antara jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius dengan kadar kreatin kinase serum pada paparan listrik melalui medium air

Correlations

		TRANS_hiperkontraksi	kadar kreatin kinase serum
TRANS_hiperkontraksi	Pearson Correlation	1	.305
	Sig. (2-tailed)	.	.147
	N	24	24
kadar kreatin kinase serum	Pearson Correlation	.305	1
	Sig. (2-tailed)	.147	.
	N	24	24

Lampiran : uji t-tidak berpasangan

- 1. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan arus listrik 1-30 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air**

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	Equal variances assumed	.889	.368	-4.274	10	.002	-176.83	41.371	269.013	-84.654
	Equal variances not assumed			-4.274	7.192	.003	-176.83	41.371	274.132	-79.535

- 2. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan arus listrik 31-60 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air**

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	Equal variances assumed	.636	.444	7.264	10	.000	-346.17	47.658	452.356	239.978
	Equal variances not assumed			7.264	9.235	.000	-346.17	47.658	453.561	238.773

3. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan arus listrik 61-90 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	Equal variances assumed	43.704	.000	2.441	10	.035	-428.83	175.672	820.256	37.411
	Equal variances not assumed			2.441	5.779	.052	-428.83	175.672	862.711	5.045

1

4. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius* akibat paparan arus listrik 91-120 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot <i>gastrocnemius</i>	Equal variances assumed	.044	.838	-2.044	10	.068	-295.67	144.621	617.903	26.570
	Equal variances not assumed			-2.044	9.968	.068	-295.67	144.621	618.044	26.711

5. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik 1-30 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Kadar kreatin kinase serum	Equal variances assumed	1.259	.288	.063	10	.951	16.50	262.193	-567.703	600.703
	Equal variances not assumed			.063	9.055	.951	16.50	262.193	-576.071	609.071

6. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik 31-60 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Kadar kreatin kinase serum	Equal variances assumed	.924	.359	1.077	10	.307	284.83	264.360	-304.198	873.865
	Equal variances not assumed			1.077	9.696	.307	284.83	264.360	-306.712	876.378

7. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik 61-90 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Kadar kreatin kinase serum	Equal variances assumed	.162	.696	.400	10	.698	152.33	381.283	-697.218	1001.884
	Equal variances not assumed			.400	9.083	.699	152.33	381.283	-708.981	1013.648

8. Perbedaan kadar kreatin kinase serum akibat paparan arus listrik 91-120 mA secara langsung dibandingkan dengan melalui medium air

Independent Samples Test

		Lavene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std.Error Difference	95 % Confidence Interval of the Difference	
Kadar kreatin kinase serum	Equal variances assumed	1.138	.311	-.101	10	.921	-35.33	349.508	-814.086	743.419
	Equal variances not assumed			-.101	9.056	.922	-35.33	349.508	-825.229	754.562

Lampiran : Data Jumlah Titik Hiperkontraksi Serabut Otot *Gastrocnemius* Ekstremitas Tikus Wistar

a. Paparan arus listrik melalui secara langsung

No.	Kelompok paparan arus listrik	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kiri-depan	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kanan-depan	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kanan-belakang	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kiri-belakang
1	kontrol	12	3	15	12
2	kontrol	14	22	2	15
3	kontrol	18	10	12	3
4	kontrol	8	10	3	2
5	kontrol	5	11	21	7
6	kontrol	20	5	4	10
7	1-30 mA	81	34	46	36
8	1-30 mA	94	20	82	100
9	1-30 mA	220	98	105	43
10	1-30 mA	70	68	119	59
11	1-30 mA	86	32	62	66
12	1-30 mA	110	54	80	37
13	31-60 mA	120	82	54	79
14	31-60 mA	76	146	83	120
15	31-60 mA	158	38	173	94
16	31-60 mA	132	126	170	101
17	31-60 mA	117	113	165	116
18	31-60 mA	154	81	91	146
19	61-90 mA	298	82	226	156
20	61-90 mA	265	129	159	193
21	61-90 mA	178	128	264	144
22	61-90 mA	110	171	65	164
23	61-90 mA	198	165	172	167
24	61-90 mA	295	129	265	174
25	91-120 mA	246	118	188	178
26	91-120 mA	256	222	262	195
27	91-120 mA	315	259	324	123
28	91-120 mA	413	154	197	246
29	91-120 mA	521	298	203	192
30	91-120 mA	497	254	382	306

b. Paparan arus listrik melalui medium air

No.	Kelompok paparan arus listrik	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kiri-depan	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kanan-depan	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kanan-	Jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius kiri-belakang
-----	-------------------------------	---	--	---	--

				belakang	
1	kontrol	12	3	15	12
2	kontrol	14	22	2	15
3	kontrol	18	10	12	3
4	kontrol	8	10	3	2
5	Control	5	11	21	7
6	Control	20	5	4	10
7	1-30 mA	120	90	133	162
8	1-30 mA	97	69	172	125
9	1-30 mA	60	176	125	84
10	1-30 mA	64	201	86	139
11	1-30 mA	159	131	160	91
12	1-30 mA	120	148	41	110
13	31-60 mA	234	198	270	264
14	31-60 mA	211	127	167	241
15	31-60 mA	192	283	226	153
16	31-60 mA	154	224	133	206
17	31-60 mA	293	217	118	160
18	31-60 mA	147	136	247	211
19	61-90 mA	188	298	113	244
20	61-90 mA	112	198	257	254
21	61-90 mA	135	200	173	146
22	61-90 mA	386	425	368	298
23	61-90 mA	428	355	336	380
24	61-90 mA	361	436	370	409
25	91-120 mA	468	348	383	454
26	91-120 mA	165	290	256	209
27	91-120 mA	311	347	295	464
28	91-120 mA	435	210	327	483
29	91-120 mA	326	355	253	265
30	91-120 mA	347	328	418	386

Lampiran : Uji Korelasi Spearman

1. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dengan kadar kreatin kinase serum tikus wistar

Case Processing Summary

Correlations

			jenis kelompok	kadar kreatin kinase
Spearman's rho	jenis kelompok	Correlation Coefficient	1.000	.632(**)
		Sig. (2-tailed)	.	.000
		N	30	30
	kadar kreatin kinase	Correlation Coefficient	.632(**)	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.
		N	30	30

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

2. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat melalui medium air dengan kadar kreatin kinase serum tikus wistar

Correlations

			jenis kelompok	kadar kreatin kinase
Spearman's rho	jenis kelompok	Correlation Coefficient	1.000	.701(**)
		Sig. (2-tailed)	.	.000
		N	30	30
	kadar kreatin kinase	Correlation Coefficient	.701(**)	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.
		N	30	30

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat secara langsung dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Correlations

			kelompok paparan arus listrik	jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius
Spearman's rho	kelompok paparan arus listrik	Correlation Coefficient	1.000	.959(**)
		Sig. (2-tailed)	.	.000
		N	30	30
	jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius	Correlation Coefficient	.959(**)	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.
		N	30	30

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

4. Korelasi antara paparan arus listrik dosis bertingkat melalui medium air dengan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot *gastrocnemius*

Correlations

			kelompok paparan arus listrik	jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius
Spearman's rho	kelompok paparan arus listrik	Correlation Coefficient	1.000	.910(**)
		Sig. (2-tailed)	.	.000
		N	30	30
	jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius	Correlation Coefficient	.910(**)	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.
		N	30	30

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Lampiran : Uji *One way ANOVA*

1. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 1-30 miliamper secara langsung

ANOVA

TRANS_C

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.474	3	.158	4.328	.017
Within Groups	.731	20	.037		
Total	1.205	23			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: TRANS_C
LSD

(I) kelompok ekstremitas	(J) kelompok ekstremitas	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiri depan 1-30 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 1-30 mA	.3585(*)	.11037	.004	.1283	.5888
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 1-30 mA	.1127	.11037	.319	-.1175	.3429
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 1-30 mA	.2828(*)	.11037	.019	.0526	.5130
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 1-30 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiri depan 1-30 mA	-.3585(*)	.11037	.004	-.5888	-.1283
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 1-30 mA	-.2458(*)	.11037	.038	-.4761	-.0156
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 1-30 mA	-.0758	.11037	.500	-.3060	.1545
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 1-30 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiri depan 1-30 mA	-.1127	.11037	.319	-.3429	.1175
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 1-30 mA	.2458(*)	.11037	.038	.0156	.4761
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 1-30 mA	.1701	.11037	.139	-.0601	.4003
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 1-30 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiri depan 1-30 mA	-.2828(*)	.11037	.019	-.5130	-.0526

jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 1-30 mA	.0758	.11037	.500	-.1545	.3060
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 1-30 mA	-.1701	.11037	.139	-.4003	.0601

* The mean difference is significant at the .05 level.

2. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 31-60 miliamper secara langsung

ANOVA

TRANS_C

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.059	3	.020	.708	.558
Within Groups	.551	20	.028		
Total	.610	23			

3. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 61-90 miliamper secara langsung

ANOVA

TRANS_C

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.135	3	.045	1.885	.165
Within Groups	.477	20	.024		
Total	.612	23			

4. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 91-120 miliamper secara langsung

ANOVA

jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	106302.458	3	35434.153	4.837	.011

Within Groups	146503.500	20	7325.175		
Total	252805.958	23			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius
LSD

(I) kelompok ekstremitas	(J) kelompok ekstremitas	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiridepan 91-120 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 91-120 mA	157.17(*)	49.414	.005	54.09	260.24
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 90-120 mA	115.33(*)	49.414	.030	12.26	218.41
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 90-120 mA	168.00(*)	49.414	.003	64.92	271.08
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 91-120 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiridepan 91-120 mA	-157.17(*)	49.414	.005	-260.24	54.09
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 90-120 mA	-41.83	49.414	.407	-144.91	61.24
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 90-120 mA	10.83	49.414	.829	-92.24	113.91
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 90-120 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiridepan 91-120 mA	-115.33(*)	49.414	.030	-218.41	12.26
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 91-120 mA	41.83	49.414	.407	-61.24	144.91
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 90-120 mA	52.67	49.414	.299	-50.41	155.74
jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiribelakang 90-120 mA	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kiridepan 91-120 mA	-168.00(*)	49.414	.003	-271.08	64.92
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kanandepan 91-120 mA	-10.83	49.414	.829	-113.91	92.24
	jml ttk hiperkontraksi gastrocnemius kananbelakang 90-120 mA	-52.67	49.414	.299	-155.74	50.41

* The mean difference is significant at the .05 level.

5. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 1-30 miliamper melalui medium air

ANOVA

jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3173.792	3	1057.931	.588	.630
Within Groups	35985.167	20	1799.258		
Total	39158.958	23			

6. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 31-60 miliamper melalui medium air

ANOVA

jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	649.333	3	216.444	.071	.975
Within Groups	61272.667	20	3063.633		
Total	61922.000	23			

7. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 61-90 miliamper melalui medium air

ANOVA

jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9944.833	3	3314.944	.258	.855
Within Groups	256705.667	20	12835.283		
Total	266650.500	23			

8. Perbedaan jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius antar ekstremitas tikus wistar akibat paparan arus listrik 91-120 miliamper melalui medium air

ANOVA

jumlah titik hiperkontraksi serabut otot gastrocnemius

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14425.125	3	4808.375	.597	.624
Within Groups	160994.833	20	8049.742		
Total	175419.958	23			

Lampiran : Metode Baku Histologis Pemeriksaan Jaringan

A. Cara pengambilan jaringan dan fiksasi

1. Mengambil jaringan yang dibutuhkan sesegera mungkin setelah mencit dimatikan (kurang dari 2 jam) dengan ukuran $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$.
2. Kemudian memasukkan ke dalam larutan fiksasi dengan urutan sebagai berikut:
 - a. Fiksasi dalam larutan Bouin maksimal 6 jam.
 - b. Kemudian jaringan dipindahkan ke dalam larutan formalin 10%.
 - c. Jaringan diperkecil ukurannya.
 - d. Jaringan dimasukkan ke alkohol 70% \pm 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan alkohol 80%-90%.
 - e. Larutan xylol alkohol 1:1 dengan waktu \pm 24 jam.
 - f. Larutan xylol 1, 2, 3 dengan waktu masing-masing 30 menit, sehingga jaringan terlihat tembus pandang.
 - g. Xylol parafin 1:1 selama 20 menit/24 jam dengan dipanaskan dalam oven 55°C .
 - h. Parafin 1, 2, 3 selama 30 menit.
 - i. Parafin 4 waktu 30 menit, lalu jaringan dicetak blok parafin, kemudian didinginkan \pm 24 jam.
 - j. Kemudian dipotong dengan mikrotom.

B. Cara pemotongan blok

1. Menyiapkan kaca objek bersih.
2. Kaca objek diberi albumin di tengahnya.
3. Direkatkan.
4. Blok yang sudah disiapkan dipotong dengan ketebalan 5 mikro, lalu dimasukkan air panas $\pm 60^{\circ}\text{C}$. Setelah jaringan mengembang, jaringan diambil menggunakan kaca objek yang sudah diberi albumin.
5. Kemudian dikeringkan.
6. Parafin yang ada pada kaca objek atau jaringan dihilangkan dengan dipanaskan dalam oven 60°C atau dengan tungku.

C. Pewarnaan

1. Xylol 1 ± 5 menit.
2. Xylol 2 ± 5 menit.
3. Alkohol xylol ± 2 menit
4. Bilas alkohol 96%-30% masing-masing ± 30 menit.
5. Bilas aquades 1x ± 10 menit.
6. Hematoksilin $\pm 2-10$ menit.
7. Bilas dengan air mengalir sampai bersih.
8. Bilas aquades.
9. Bilas alkohol 50-96%.
10. Eosin $\pm 2-5$ menit.
11. Bilas alkohol 96% 2x.

12. Bilas alkohol xylol langsung dibersihkan kotoran-kotoran yang ada di sekitar jaringan.
13. Xylol $1,2 \pm 5$ menit, langsung ditutup kaca penutup.
14. Maka jadilah preparat.

Lampiran : Rangkaian Listrik untuk Penelitian Eksperimental Sengatan Listrik

