

BAB II
KERANGKA TEORETIK
DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1 Kerangka Teoretik

2.1.1. Gejala Peralihan (Transien)

Gejala peralihan atau transien merupakan perubahan nilai tegangan atau arus maupun keduanya baik sesaat maupun dalam jangka waktu tertentu (dalam orde mikro detik) dari kondisi tunaknya (*steady state*).¹ Penyebabnya adalah dapat dari lingkungan atau faktor eksternal seperti petir, dan dapat juga akibat perlakuan terhadap sistem itu sendiri atau faktor internal seperti pensaklaran. Transien sudah lama digunakan dalam istilah tenaga listrik sebagai sesuatu kejadian yang sebenarnya tidak diinginkan dan sifatnya sangat cepat, namun merupakan suatu kejadian yang alami sehingga tidak dapat dicegah. Kondisi transien dapat berupa tegangan ataupun arus.

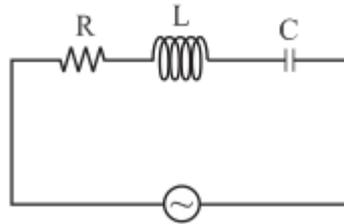
Kapan saja sebuah rangkaian diubah dari suatu keadaan atau kondisi ke keadaan lainnya, entah karena perubahan sumber terpasang (perubahan) dari elemen-elemen rangkaian, terdapat suatu peralihan(transisi) selama mana arus- arus cabang dan tegangn-tegangan elemen berubah dari nilai semula menjadi nilai yang baru. Periode ini disebut peralihan(transien).²

Pada rangkaian listrik, transien merupakan suatu karakteristik respon alami tegangan atau arus dari sistem yang terdiri dari komponen resistif (R), induktif (L) dan kapasitif (C). Ada 3 respon yang dikenal, yaitu respon alami

¹ Dwi Febrianto, Analisis Karakteristik Arus Inrush pada pensaklaran Lampu Hemat Energi[skripsi], Depok,Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,2008,hlm.3.

² Joseph A Edminister, *Rangkaian Listrik*. Jakarta, Erlangga, 1995, hlm. 63.

kurang teredam (*underdamped*), teredam kritis (*crititically damped*) dan sangat teredam (*overdamped*). Karena disini membicarakan arus maka respon yang dimaksud adalah respon arus, sehingga rangkaiannya adalah sebuah rangkaian seri.



Gambar 2.1 Rangkaian seri RLC

Secara matematis dalam ilmu rangkaian listrik dapat dijelaskan 3 respon ini. Suatu rangkaian listrik sederhana yang terdiri dari komponen aktif R juga komponen pasif L dan C dirangkai secara seri seperti pada gambar 2.1. Dari gambar 2.1, dengan menggunakan analisis mesh dapat diturunkan persamaan tegangannya, yaitu :

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{c} = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dan dengan menggunakan persamaan diferensial orde 2 dan pemisalan $i = Ae^{st}$ maka:

$$L A s^2 e^{st} + R A s e^{st} + \frac{1}{c} A e^{st} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$A e^{st} (L s^2 + R s + \frac{1}{c}) = 0 \dots\dots\dots (2.3)$$

$$L s^2 + R s + \frac{1}{c} = 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{dengan } S_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{atau } S_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} ; \alpha = -\frac{R}{2L} ; \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \dots\dots\dots (2.6)$$

- Untuk $\alpha > \omega_0$, merupakan kondisi *overdamped*

$$i(t) = A_1 e^{st} + A_2 e^{st} \dots \dots \dots (2.7)$$

- Untuk $\alpha = \omega_0$, merupakan kondisi *critically damped*

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 + A_2) \dots \dots \dots (2.8)$$

- Untuk $\alpha < \omega_0$, merupakan kondisi *underdamped*

$$i(t) = e^{-\alpha t} (B_1 \cos \omega_d t + B_2 \sin \omega_d t) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \dots \dots \dots (2.10)$$

Konstanta A1, A2, B1, dan B2 didapat dengan menggunakan kondisi awal (*initial condition*).

Pada dasarnya, dalam bidang ilmu ketenagalistrikan hanya ada dua jenis transien yang dikenal, yaitu :

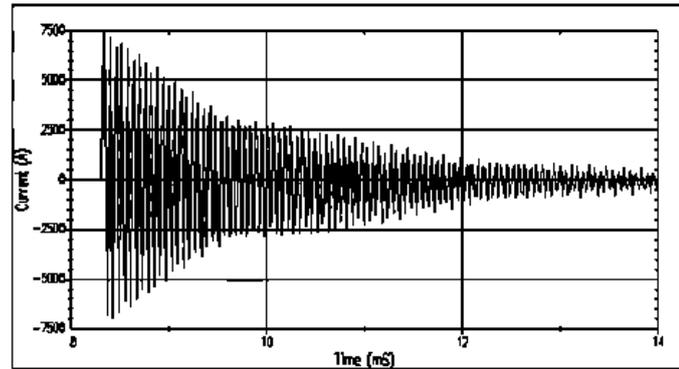
1. *Oscillatory transient*, memiliki respon transien sama seperti *underdamped*
2. *Impulsive transient*, yang merupakan perwakilan dari kondisi *overdamped* dan *critically damped*.

2.1.1.1. Transien Osilasi (*Oscillatory Transient*)

Transien osilasi adalah suatu respon lonjakan sesaat dari karakteristik arus atau tegangan tanpa mengubah frekuensi dari kondisi *steady state* dengan bentuk gelombang yang memiliki polaritas bolak-balik (positif dan negatif). Transien osilasi ini dapat terjadi karena adanya gangguan (*fault*) atau karena operasi pensaklaran (*switching*).

Bentuk gelombang transien osilasi sesuai dengan persamaan eksponensial dengan fungsi sinusoidal. Sama halnya dengan transien impulsif, transien osilasi juga ditinjau dari respon maksimum (I_{maks} atau V_{maks}), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi maksimum dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai

keadaan tunak.



Gambar 2.2 Transien Osilasi pada pensaklaran kapasitor

Dalam bidang ilmu ketenagalistrikan, transien osilasi dibagi menjadi 3, yaitu :

1. Transien osilasi frekuensi tinggi, dengan frekuensi lebih besar dari 500 kHz dan durasi waktunya terukur dalam mikrodetik. untuk beberapa siklus. Transien ini biasanya terjadi karena respon dari sistem terhadap transien impulsif.
2. Transien osilasi frekuensi menengah, dengan frekuensi komponen diantara 5 – 500 kHz dan durasi waktunya terukur dalam puluhan mikrodetik. Transien ini terjadi karena pensaklaran kapasitor ataupun pensaklaran beban. Transien ini juga dapat terjadi karena respon dari sistem terhadap transient impulsif.
3. Transien osilasi frekuensi rendah, dengan frekuensi dibawah 5 kHz dan durasi waktunya 0,3 – 0,5 ms. Transien ini biasanya terjadi pada sistem subtransmisi dan distribusi, dan dapat disebabkan oleh beberapa kejadian. Paling sering adalah karena pelepasan energi dari kapasitor bank yang menghasilkan transien dengan frekuensi 300 – 900 Hz.

Transien frekuensi rendah biasanya mempunyai frekuensi pokok kurang dari 300 Hz and terjadi dalam sistem distribusi. Hal ini terkait dengan ferroresonansi dan pelepasan energi transformator. Transien dikarenakan

kapasitor terhubung seri juga masuk kategori ini.

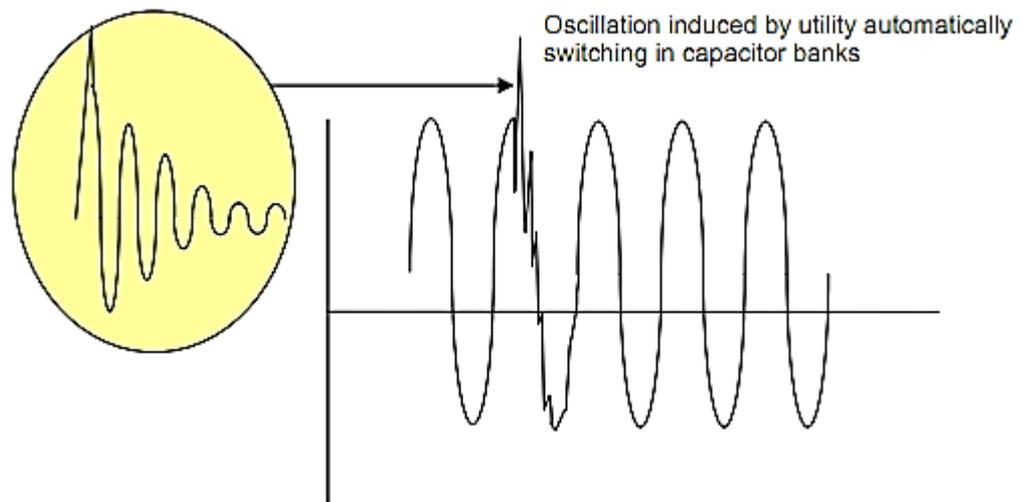
Sebuah osilasi transien adalah perubahan mendadak dalam kondisi mapan dari tegangan sinyal, saat ini, atau keduanya, baik pada batas-batas sinyal positif dan negatif, berosilasi pada alam sistem frekuensi. Dalam istilah sederhana, sementara menyebabkan sinyal listrik untuk bergantian membengkak dan kemudian menyusut, sangat cepat. Transien berosilasi biasanya meluruh sampai nol dalam siklus.³

Transien ini terjadi ketika Anda menonaktifkan beban induktif atau kapasitif, seperti motor atau kapasitor bank. Sebuah hasil osilasi transien karena beban menolak perubahan. Hal ini mirip dengan apa yang terjadi bila anda tiba-tiba mematiak kran cepat mengalir dan mendengar kebisingan di dalam pipa. Air mengalir menolak perubahan, dan setara fluida dari osilasi transien terjadi.

Misalnya, saat mematikan motor yang berputar, ia bertindak sebagai generator sebentar karena kekuatan bawah, sehingga menghasilkan listrik dan mengirimkannya melalui distribusi listrik. Sebuah panjang sistem distribusi listrik dapat bertindak seperti *osilator* ketika daya dinyalakan atau dimatikan, karena semua sirkuit memiliki beberapa induktansi dan kapasitansi yang melekat terdistribusi yang singkat energi dalam bentuk membusuk.

Ketika transien berosilasi muncul pada sirkuit energi, biasanya karena penggunaan pensaklaran pada operasi (terutama ketika bank kapasitor secara otomatis diaktifkan ke dalam sistem), mereka bisa sangat mengganggu peralatan elektronik. Gambar 2.3 menunjukkan frekuensi rendah khas transien disebabkan osilasi ke bank kapasitor diberi energi.

³ Ikwanul Kholis, *Stabilitas Transien*, <http://ikkkholis27.wordpress.com/2013/01/28/stabilitas-transient.html>, diakses 16 April 2013 jam 14.59 WIB.



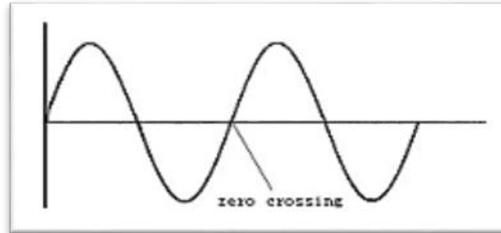
Gambar 2.3 frekuensi rendah khas Transient

Masalah yang paling diakui terkait dengan pensaklaran pada kapasitor dan osilasi transien adalah tersandung *adjustable speed drive* (ASD). Transien relatif lambat menyebabkan kenaikan dalam tegangan jaringan dc (tegangan yang mengontrol aktivasi dari ASD), yang menyebabkan dorongan untuk perjalanan *off-line* dengan indikasi kelebihan tegangan.

Sebuah solusi umum untuk kapasitor tersandung adalah instalasi reaktor baris atau tersedak yang meredam osilasi transien ke tingkat yang dikelola. Reaktor-reaktor ini dapat diinstal depan drive atau pada link dc dan tersedia sebagai fitur standar atau sebagai pilihan pada ASD.

Solusi lain naik ke kapasitor beralih masalah transien adalah saklar *zero crossing*. Ketika busur gelombang sinus yang turun dan mencapai tingkat nol (sebelum menjadi negatif), ini dikenal sebagai persimpangan nol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sebuah transien yang disebabkan oleh pensaklaran kapasitor akan memiliki magnitudo yang lebih besar semakin jauh. Pensaklaran terjadi jauh dari nol melintasi waktu dari gelombang sinus. Sebuah *switch zero crossing* memecahkan masalah ini dengan memantau gelombang sinus untuk

memastikan bahwa beralih kapasitor terjadi sedekat mungkin dengan nol melintasi waktu dari gelombang sinus.

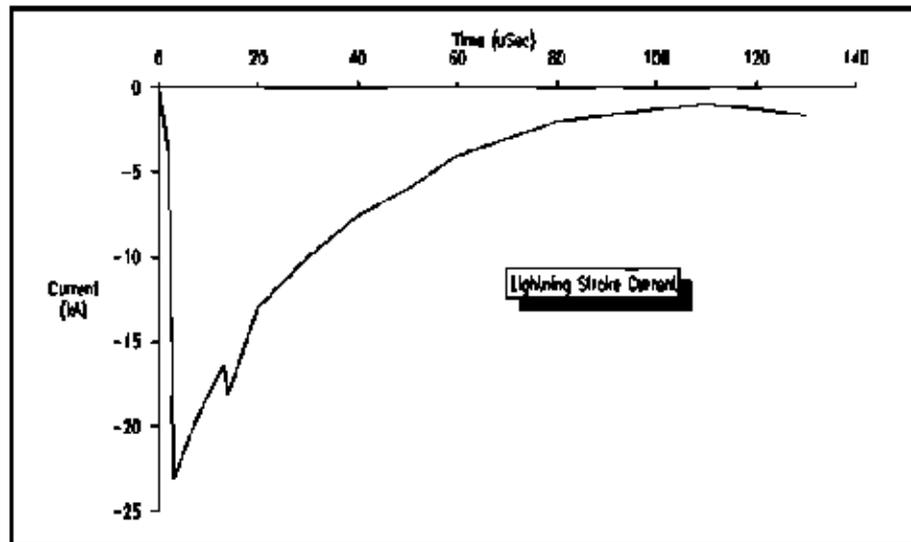


Gambar 2.4 Zero crossing

Tentu saja UPS dan sistem SPD juga sangat efektif dalam mengurangi bahaya osilasi transien, terutama antara pengolahan data peralatan umum seperti untuk komputer dalam jaringan. Namun, SPD dan UPS kadang-kadang dapat tidak mencegah kejadian transien osilasi pada saklar *zero crossing* atau jenis perangkat dapat mencegah pada peralatan khusus, seperti mesin manufaktur lantai dan mereka sistem kontrol.

2.1.1.2. Transien Impulsif (*Impulsive Transient*)

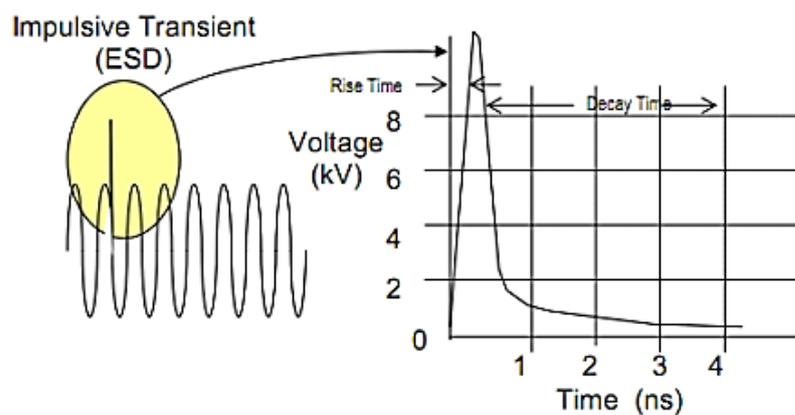
Transien impulsif adalah suatu respon kondisi lonjakan sesaat karakteristik arus atau tegangan tanpa mengubah frekuensi dari kondisi tunak dengan bentuk gelombang yang memiliki polaritas searah. Bentuk gelombangnya sesuai dengan persamaan eksponensial murni. Salah satu penyebab transien impulsif adalah sambaran petir.



Gambar 2.5 Transien impulsif pada sambaran petir

Transien impulsif adalah peristiwa puncak tiba-tiba tinggi yang meningkatkan tegangan atau arus tingkat baik positif atau arah negatif. Jenis peristiwa dapat dikategorikan lebih lanjut oleh kecepatan (cepat, sedang, dan lambat). Transien impulsif bisa sangat cepat peristiwa (5 nanodetik [ns] waktu naik dari steady state ke puncak impuls) dari jangka pendek durasi (kurang dari 50 nanodetik).

Salah satu contoh dari transien impulsif positif disebabkan oleh elektrostatis (ESD) acara debit diilustrasikan pada Gambar 2.6 di bawah.

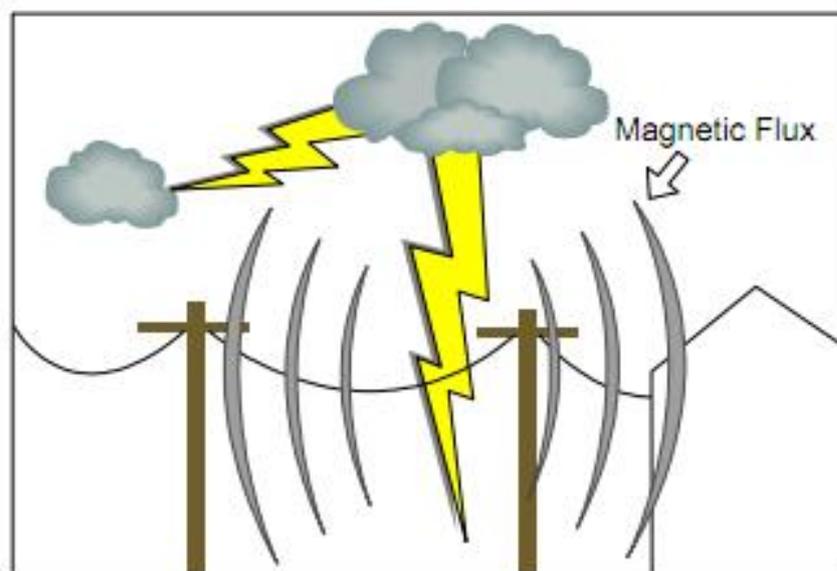


Gambar 2.6 Positif Impulsif Transient

Transien impulsif adalah peningkatan atau lonjakan tiba-tiba yang sanfat cepat. Banyak istilah-istilah yang berbeda, seperti gelombang benjolan, *power fault* dan *spike* telah digunakan untuk menggambarkan transien impulsif.

Penyebab transien impulsif termasuk petir, kurangnya *grounding*, pensaklaran, beban induktif, dan Electrostatic Discharge (ESD). Hasil dapat berkisar dari kerugian (atau korupsi) data, kerusakan fisik peralatan. Dari yang lainnya petir yang paling merusak.

Masalah dengan petir mudah dikenali setelah menyaksikan badai listrik. Pada jumlah energi yang dibutuhkan untuk menerangi langit malam dapat menghancurkan sensitivitas peralatan. Selain itu, tidak mengambil sambaran petir langsung dapat menyebabkan kerusakan medan elektromagnet, Gambar 2.7, diciptakan oleh petir yang dapat menyebabkan banyak kerusakan dengan menginduksi ke struktur konduktif terdekatnya.



Gambar 2.7 Medan Magnet Dibuat Oleh Petir

Dua dari metode perlindungan yang paling layak ketika datang ke transien impulsif berkaitan dengan penghapusan ESD potensial, dan penggunaan alat surge

suppression (populer disebut sebagai penekan lonjakan tegangan transien: TVSS, atau perangkat pelindung lonjakan: SPD).

Sementara ESD terdapat busur di dalam sedangkan di luar terdapat aliran arus sedikit, lebih dari cukup untuk menyebabkan seluruh *motherboard* komputer untuk mati dan tidak pernah berfungsi lagi. Di pusat data, fasilitas manufaktur *printed circuit board* atau apapun yang serupa lingkungan di mana PCB terkena manusia penting untuk menghilangkan potensial untuk ESD. Sebagai contoh, hampir semua lingkungan data center yang tepat melibatkan pengondisian udara dalam ruangan. Penyejuk udara tidak hanya mendinginkan udara untuk membantu menghilangkan panas dari peralatan data center, tetapi juga menyesuaikan jumlah uap air di udara. Menjaga kelembaban di udara antara 40 – 55% kelembaban akan mengurangi potensi untuk ESD terjadi.

Peralatan perlindungan ini meliputi tali pergelangan tangan, antistatik tikar dan desktop, dan alas kaki antistatik. Sebagian besar peralatan ini terhubung ke kawat, yang mengarah ke tanah fasilitas, yang membuat orang aman dari sengatan listrik dan juga mungkin menghilang ESD ke tanah.

SPD telah digunakan selama bertahun-tahun. Alat ini masih digunakan sampai sekarang pada sistem utilitas, serta perangkat untuk fasilitas besar dan pusat data, serta usaha kecil sehari-hari dan rumah menggunakannya untuk meningkatkan kinerja mereka dengan kemajuan varistor oksida logam (MOV) teknologi. MOV memungkinkan untuk supresi transien konsisten impulsif, membengkak, dan kondisi tegangan tinggi lainnya dapat dikombinasikan dengan perangkat panas seperti pemutus sirkuit, termistor, serta komponen lain seperti tabung gas dan *thyristor*. Dalam beberapa kasus SPD sirkuit dibangun ke dalam

perangkat listrik sendiri, seperti komputer pasokan listrik dibangun dengan kemampuan menekan lonjakan. Lebih umum, mereka digunakan saat menyala saja atau disertakan dengan UPS untuk memberikan pencegahan konsleting ketika darurat seperti daya baterai dalam gangguan (atau ketika tingkat daya di luar batas nominal, atau aman, kondisi listrik).

SPD *cascading* dan perangkat UPS, adalah metode yang paling efektif untuk perlindungan terhadap gangguan, untuk peralatan elektronik. Menggunakan teknik ini, sebuah perangkat SPD ditempatkan di saluran masuk untuk menghilangkan banyak energi dari transien masuk. Berikutnya perangkat pada sub-panel listrik dan pada peralatan yang sensitif ketika tegangan jepit dalam tingkat yang tidak merusak atau mengganggu peralatan. Perhatian khusus harus diberikan untuk rating tegangan dan rating energi disipasi perangkat dan mengkoordinasikan perangkat untuk operasi yang efektif. Juga, perhatian harus diberikan kepada efektivitas perangkat menekan lonjakan dalam hal MOV mencapai titik kegagalan. Sementara MOV adalah konsisten dalam kemampuan gelombang lonjakan dari waktu ke waktu, masih bisa diturunkan atau bisa gagal jika laju kemampuan penahan efektif adalah terlampaui. Hal ini penting bahwa jika MOV tidak mencapai titik di mana ia tidak lagi berguna, SPD mampu mencegah anomali kekuatan yang merusak peralatan.

Transien impulsif sering kali ditinjau dari beberapa karakteristik penting yang menunjukkan kondisi respon impulsif tersebut, seperti besar respon maksimum (I_{maks} atau V_{maks}), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi maksimum dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tunak. Karakteristik tersebut biasanya dinyatakan oleh notasi, contohnya $1,2 \times 50 \mu s$

2000 V. Ini artinya transien impulsif nilainya naik dari nol menuju nilai puncak 2000 V dalam 1,2 mikrodetik dan turun sampai setengahnya dalam 50 mikrodetik.

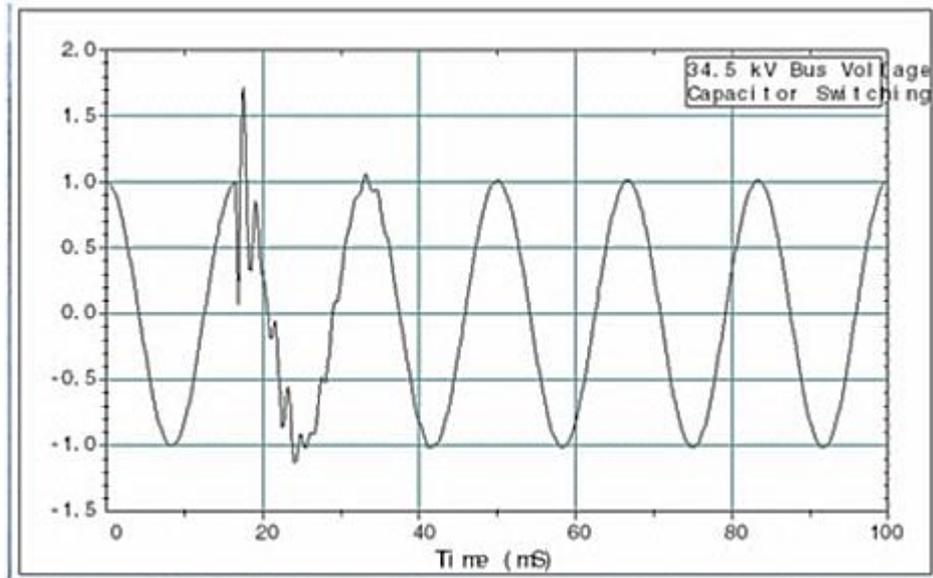
Karena peralihan ini berada dalam frekuensi yang tinggi maka bentuk dari gelombang peralihan dapat berubah secara cepat oleh komponen rangkaian dan akan mempunyai bentuk gelombang yang berbeda bila dilihat pada komponen lain dari sistem daya.

2.1.1.3. Overvoltage Transien

Secara umum, ada 3 macam Transient Overvoltage, yaitu:

2.1.1.3.1 *low frequency transients*

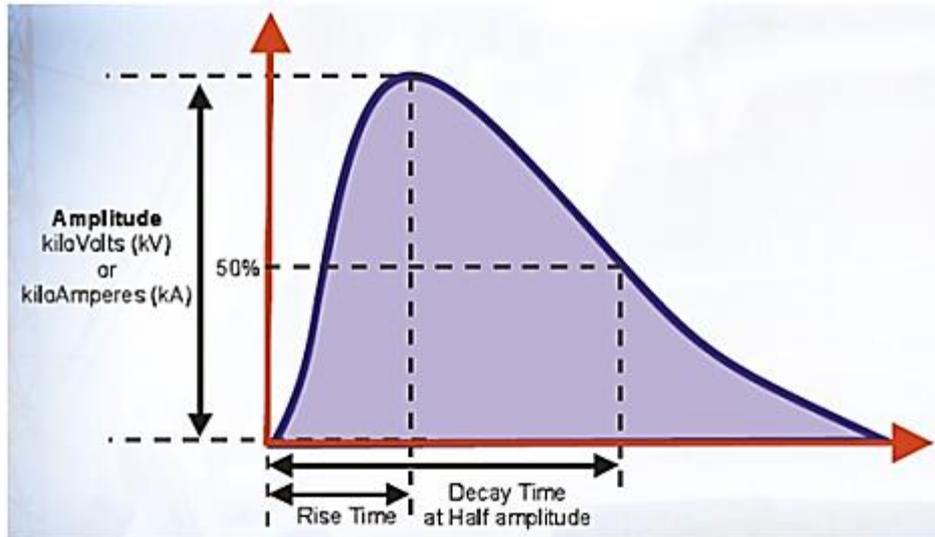
Low frequency transients dengan komponen frekuensi beberapa ratus hertz yang biasanya disebabkan oleh pensaklaran kapasitor (*Capacitor Switching Transient*). *Low frequency transients* terjadi jika kapasitor melepaskan muatan untuk melakukan perbaikan disipasi energi pada tegangan jala-jala. Induktansi yang ada di jala-jala kemudian menyebabkan resonansi yang terjadi pada frequency 400-600 hertz pada sistem distribusi. Hal ini akan menyebabkan adanya gelombang eksponensial teredam. Puncak gelombang ini secara teoritis tidak akan melebihi 2x nilai puncak gelombang fundamental. Biasanya 120%-140%. Akan tetapi, nilai ini akan berlipat jika terjadi resonansi dengan kapasitor yang lain.



Gambar 2.8 Capacitor Transient

2.1.1.3.2. *high-frequency transients*

High-frequency transients dengan komponen frekuensi beberapa ratus kilo-hertz yang biasanya disebabkan oleh muatan induktif atau petir (*impulse, spike, surge*). *High frequency transients* dapat disebabkan petir, atau pemutusan beban induktif. Rise-time-nya umumnya berlangsung dalam orde *microsecond*, delay-time-nya berlangsung dalam orde puluhan sampai ratusan *microsecond*. Kadang, delay-nya berupa gelombang osilasi yang teredam secara eksponensial dengan frekuensi sekitar 100 kHz yang sesuai dengan frekuensi *inductor/capacitor equivalent* model dari jala-jala listrik tegangan rendah. Puncaknya bisa ratusan sampai ribuan volt, arus yang dihasilkan bisa mencapai beberapa ribu ampere.



Gambar 2.9 Transient Petir

2.1.1.3.3 *Extremely Fast Transients*

Extremely Fast Transients, atau **EFT**, memiliki waktu naik (*rise time*) dan waktu turun (*fall time*) dalam orde nanodetik. Transient ini dapat disebabkan oleh adanya *arcing faults* seperti jeleknya sikat pada motor dan dapat segera teredam.

2.1.2. Penyebab Transien pada Rangkaian Listrik

Fenomena transien (peralihan) dalam sistem kelistrikan ditimbulkan oleh

.4

- a) Sambaran Petir / LOV (*Lightning Over Voltage*)
- b) Pensaklaran / Terpa Hubung / SOV (*Switching Over Voltage*)
- c) Ledakan Nuklir / NEMP (*Nuclear Electromagnetic Pulse*) atau HEMP (*High Altitude Electromagnetic Pulse*)

⁴ Arifin, *Penyebab Transien Listrik*, <http://el-03.blogspot.com/2009/11/penyebab-transien-listrik.html>, diakses pada tanggal 16 April 2013 pada pukul 15.04

2.1.2.1. Sambaran Petir / LOV (*Lightning Over Voltage*)

Petir didefinisikan sebagai peristiwa pelepasan arus yang sangat besar (200 kA) ke arah benda yang ditanahkan (berada di tanah). Bila petir menyambar suatu titik, tegangan yang dibangkitkan sama dengan arus pelepasan petir tersebut dikalikan dengan impedansi sistem yang dilihat oleh arus petir tadi. Tegangan ini dapat bernilai puluhan kali dari satuan MV. Makin tinggi struktur bangunan (objek), maka kemungkinan tersambar petir juga akan semakin besar. SUTT(Saluran Udara Tegangan Tinggi) dengan tiang menara yang tinggi rentan terhadap sambaran langsung. Namun, walaupun misalnya petir hanya menyambar ke permukaan tanah, medan magnet dan medan listrik petir dapat menginduksikan tegangan yang cukup tinggi pada SUTR(Saluran Udara Tegangan Rendah) untuk menghasilkan kegagalan (gangguan). Kadangkala, pengaruh petir juga dirasakan melalui kenaikan tegangan tanah yang disebabkan oleh aliran arus yang besar. Medan elektrostatik awan juga dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan elektronik dan telekomunikasi.

Arus petir meningkat ke harga puncaknya dalam waktu yang bervariasi dari yang lebih kecil dari 1 detik sampai 20 detik, lalu menurun ke harga yang rendah dalam waktu beberapa ratus detik. Komponen arus-rendah kedua akan bertahan biasanya untuk waktu beberapa detik. Sambaran petir merupakan fenomena yang acak (tak tentu). Tetapi, data statistik pada arus puncak, bentuk gelombang, dan frekuensi sambaran (yaitu kerapatan lewat tanah = *ground flash density*) di seluruh dunia telah terkumpul selama beberapa tahun. Data-data tersebut digunakan untuk merancang perlindungan sistem tenaga listrik.

2.1.2.2. Pensaklaran / Terpa Hubung / SOV (*Switching Over Voltage*)

Penyebab fenomena transien adalah adanya perubahan parameter rangkaian, yang biasanya terjadi akibat pensaklaran, rangkaian terbuka (*open circuit*) atau hubung singkat (*short circuit*), perubahan dalam operasi sumber, dll. Perubahan arus, tegangan, dan yang lain selama transien tidak berlangsung seketika (*instant*) dan membutuhkan waktu, walaupun perubahan ini terjadi secara cepat dalam hitungan milidetik atau bahkan mikrodetik.

Perubahan yang sangat cepat ini bagaimanapun juga tidak dapat terjadi secara seketika karena proses transien dicapai melalui pertukaran energi, yang biasanya tersimpan dalam medan magnet dari induktansi dan atau medan listrik dari kapasitansi. Perubahan energi tidak dapat terjadi secara mendadak karena akan menghasilkan daya yang tidak terbatas (daya adalah turunan dari energi, $P = dW/dt$), yang tidak mungkin terjadi dalam keadaan sesungguhnya.

Semua perubahan parameter saat transien (yang disebut juga respon transien) kemudian menghilang, dan akan muncul keadaan tunak baru. Dalam hal ini, transien dapat didefinisikan sebagai perilaku rangkaian diantara dua keadaan tunak, yaitu keadaan tunak yang lama (sebelum perubahan) dan keadaan tunak yang baru.

Terpa hubung (*switching surge*) timbul karena sifat induktansi yang melekat dan berkaitan erat dengan suatu rangkaian listrik. Teori fluks lingkup menyatakan bahwa induktansi berlawanan (berbanding terbalik) dengan perubahan arus yang disebabkan oleh tegangan induksi. Sehingga, bila suatu saklar (CB = *circuit breaker*) bekerja menginterupsi arus, tegangan yang ditimbulkan oleh induktansi rangkaian akan melawan pada tiap perubahan arus.

Makin cepat saklar menginterupsi arus, maka makin tinggi tegangan terpa hubung yang dihasilkan. Energi yang tersimpan dalam induktansi akan bergerak masuk dan keluar antara induktansi dan kapasitansi sistem listrik dan akhirnya dilepaskan pada elemen resistif, sehingga meredam gelombang tegangan yang berosilasi.

Terpa hubung, sama seperti petir, juga merupakan fenomena acak yang sangat besar. Kekuatan terpa hubung bergantung pada kecepatan tegangan frekuensi daya saat saklar terbuka. Ia juga bergantung pada karakteristik dinamik dari busur listrik bila saklar terbuka. Tetapi, berbeda dengan petir, terpa hubung dapat dikendalikan pada sumber dengan perancangan saklar yang tepat. Terpa hubung secara umum berkaitan erat dengan waktu muka yang lama (beberapa ratus detik) dan waktu ekor (beberapa mili detik). Tetapi, pada jenis saklar tertentu (saklar vakum, SF₆) akan menghasilkan transien tegangan dalam satuan nano detik. Perkembangan jenis-jenis CB (*Circuit Breaker*) yang baru (vakum & SF₆) menyebabkan masalah terpa hubung menjadi lebih berat, meskipun kemampuan interupsi arus gangguan pada CB (*Circuit Breaker*) meningkat secara signifikan.

2.1.2.3. Ledakan Nuklir / NEMP (*Nuclear Electromagnetic Pulse*) atau HEMP (*High-Altitude Electromagnetic Pulse*)

Penyebab transien listrik yang ketiga adalah ledakan nuklir pada jarak yang tinggi (40 km) di atas permukaan bumi. Fenomena transien ini disebut HEMP (*High-Altitude Electromagnetic Pulse*), atau NEMP (*Nuclear Electromagnetic Pulse*). HEMP tidak mengakibatkan efek lain seperti ledakan

nuklir pada umumnya seperti panas, gelombang kejut atau kerusakan karena radioaktif. HEMP dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu E1, E2, dan E3. E1 adalah medan listrik transien berdurasi pendek berwaktu muka curam (SFSD = *Steep-Front Short-Duration*) yang naik ke harga puncaknya sampai puluhan kV per meter dalam waktu kurang dari 10 nano detik, dan menurun ke dekat nol dalam waktu kurang dari 1 detik. E1 diikuti oleh EMP jenis menengah atau E2, yang mempunyai amplitudo ratusan volt per meter dalam periode waktu sekitar 1 detik sampai 0,1 detik. EMP yang terakhir, E3 atau disebut *magnetohydrodynamic* EMP (MHD-EMP), dihasilkan dari gangguan-gangguan geomagnetik yang disebabkan oleh ledakan nuklir berketegangan tinggi. MHD-EMP merupakan EMP bermagnitud rendah pada orde 10 V per km yang muncul 0,1 detik setelah ledakan, dan berakhir dari beberapa detik sampai puluhan detik. E1 dan E2 adalah signifikan untuk sistem tenaga listrik karena pengaruhnya yang kuat dan daerah jangkauannya yang luas.

Walaupun EMP secara biologis tidak berbahaya, tetapi ia dapat merusak sistem komunikasi, alat elektronik dan elektrikal dengan menginduksikan terpa arus dan tegangan melalui material konduksi secara listrik.

2.1.3. Transien Dalam Rangkaian Listrik

Dalam analisa rangkaian listrik harus dibedakan antara operasi statis atau keadaan tunak, dan operasi dinamis atau keadaan transien. Sebuah rangkaian listrik dikatakan dalam keadaan tunak yaitu saat variabel-variabelnya (tegangan, arus, dll) menunjukkan perilaku dari masing-masing variabel tersebut yang tidak berubah terhadap waktu (pada rangkaian searah) atau berubah secara periodik (pada rangkaian bolak-balik). Dan rangkaian dikatakan dalam keadaan transien

saat variabel-variabelnya berubah tidak secara periodik.

Dalam rangkaian yang terdapat komponen induktansi (L) dan kapasitansi (C), parameter L dan C dikarakteristikan oleh kemampuannya dalam menyimpan

energi, yaitu energi magnetik (w_m) pada L :

$$W_m = \frac{1}{2} \Psi = \frac{1}{2} Li^2 \dots\dots\dots$$

.....(2.11)

$$\Psi = L_i \text{ (dalam medan magnet)} \dots\dots\dots(2.12)$$

dan energi listrik (W_e) pada C :

$$W_e = \frac{1}{2} qv = \frac{1}{2} Cv^2 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$q = Cv \text{ dalam medan listrik} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sumber arus dan tegangan adalah elemen dimana energi disuplai ke rangkaian. Demikianlah, dapat dikatakan bahwa rangkaian listrik, sebagai sistem fisik dikarakteristikan sebagai sejumlah kondisi energi dalam perilaku keadaan tunaknya. Pada kondisi keadaan tunaknya energi yang tersimpan dalam berbagai induktansi dan kapasitansi, dan disuplai ke sumber dalam rangkaian searah adalah konstan mengingat dalam rangkaian bolak-balik energi diubah (perubahan antar medan magnet dan medan listrik, dan disuplai oleh sumber) secara periodik.

Saat terdapat perubahan tiba-tiba dalam rangkaian, biasanya ada redistribusi energi diantara L dan C, dan perubahan dalam status energi sumber yang diperlukan oleh kondisi baru. Redistribusi energi ini tidak bisa terjadi seketika tapi membutuhkan waktu, sehingga menghasilkan keadaan transien.

Alasan utama dari pernyataan ini adalah energi yang seketika

membutuhkan daya yang tidak terbatas, yang diasosiasikan dengan induktor dan kapasitor. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, daya adalah turunan dari energi dan perubahan seketika dalam energi akan menghasilkan daya yang tidak terbatas.

Karena daya yang tidak terbatas tidak mungkin ada dalam sistem sebenarnya, maka energi tidak dapat berubah seketika, tapi hanya dalam periode waktu dimana transien terjadi. Demikianlah, dari sudut pandang secara fisik dapat dikatakan bahwa keadaan transien terjadi dalam sistem fisik saat kondisi energi dari satu keadaan tunak sedang diubah ke yang lain.

Perhatian berikutnya adalah mengenai arus dan tegangan. Untuk mengubah energi magnetik memerlukan perubahan arus melalui induktansi. Oleh karena itu, arus dalam rangkaian induktif atau cabang induktif dari rangkaian tidak dapat berubah seketika. Dari sudut pandang lain, perubahan arus dalam induktor membawa tegangan induksi dari nilai $L (di/dt)$.

Perubahan secara instan dari arus akan kemudian memerlukan tegangan yang tidak terbatas, yang dalam keadaan sesungguhnya tidak mungkin ada. Karena tegangan induksi diberikan oleh $d\psi/dt$, dimana ψ adalah fluks magnetik dan nilai fluks magnetik tidak bisa berubah seketika.

Kemudian kita mendapatkan bahwa untuk mengubah energi listrik memerlukan perubahan tegangan pada kapasitor yang diberikan oleh $v = q/C$, dimana q adalah besarnya muatan. Maka, baik tegangan pada kapasitor maupun muatannya bisa berubah seketika. Sebagai tambahan, tingkat dari perubahan tegangan adalah $dv/dt = (1/C) dq/dt = i/C$ dan perubahan seketika dari tegangan akan menghasilkan arus yang tidak terbatas, yang juga tidak mungkin dalam

keadaan sebenarnya. Oleh karena itu, dapat kita simpulkan bahwa perubahan apapun dalam rangkaian listrik, akan menghasilkan perubahan dalam distribusi energi yang akan menghasilkan keadaan transien.

Dengan kata lain, dengan adanya pensaklaran, interupsi, rangkaian hubung singkat atau apapun perubahan yang sangat cepat yang terjadi dalam rangkaian listrik, fenomena transien akan muncul. Secara umum, setiap perubahan dari suatu keadaan akan menghasilkan penyimpangan dari keadaan biasanya (perilaku keadaan tunak dari rangkaian) ke yang lain.

Redistribusi energi, mengikuti perubahan seperti di atas, misalnya keadaan transien, yang memerlukan waktu yang tidak terbatas. Bagaimanapun juga, dalam kenyataan perilaku transien dari rangkaian listrik berlanjut pada periode waktu yang sangat pendek, setelah tegangan dan arus mencapai nilai keadaan tunak barunya.

Perubahan dalam distribusi energi selama transien dari rangkaian listrik diatur oleh prinsip konservasi energi, misalnya jumlah dari energi yang disuplai adalah sama dengan sejumlah energi yang tersimpan ditambah disipasi energi. Tingkat disipasi energi mempengaruhi interval waktu peralihan. Makin tinggi disipasi energi, semakin pendek waktu peralihan. Disipasi energi terjadi dalam resistansi rangkaian dan penyimpanannya mengambil tempat pada induktansi dan kapasitansi.

Dalam rangkaian yang hanya terdapat resistansi, tidak ada induktansi dan kapasitansi, maka keadaan transien tidak akan muncul, dan perubahan dari satu keadaan tunak ke keadaan tunak yang lain akan berlangsung seketika. Bagaimanapun juga, rangkaian resistif pun akan tetap mengandung induktansi

dan kapasitansi, keadaan peralihan akan muncul dalam rangkaian tersebut, tetapi transien ini sangat kecil nilainya dan cepat sekali, serta tidak menimbulkan nilai yang signifikan sehingga dapat diabaikan.

Fenomena transien yang terjadi pada rangkaian listrik bisa dikarenakan pensaklaran yang disengaja, yang termasuk di dalamnya peralatan untuk pensaklaran, atau bisa juga dikarenakan pensaklaran yang tidak disengaja yang dapat berasal dari adanya gangguan pentanahan (*ground fault*), rangkaian hubung singkat, kerusakan induktor dan atau kapasitor, dan juga sambaran petir.

2.1.4 Steady State

Steady state atau keadaan tunak adalah keadaan rangkaian mantap setelah peralihan selesai.⁵ Dalam hal ini tegangan dan arus yang dibangkitkan akan stabil dengan mempunyai nilai puncak yang tetap atau tidak berubah lagi.

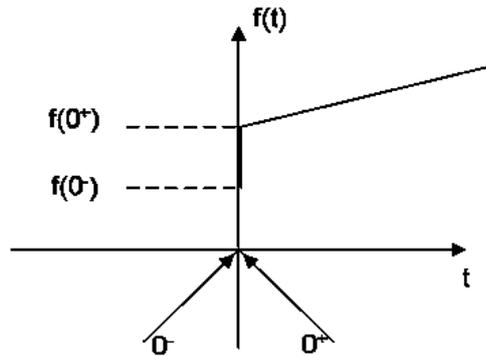
2.1.5 Hukum Pensaklaran

Prinsip perubahan energi yang berangsur-angsur dalam sistem apapun, dan terutama dalam sebuah rangkaian listrik, menunjukkan bahwa energi yang tersimpan dalam medan listrik dan medan magnet tidak dapat berubah seketika. Energi magnetik berhubungan dengan fluks magnetik dan arus yang melalui induktansi ($w_m = \lambda iL / 2$), keduanya ini tidak diperbolehkan untuk berubah secara seketika.

Dalam analisa transien, merupakan hal umum untuk mengasumsikan bahwa pensaklaran akan mengambil waktu pada $t = 0$ (atau $t = t_0$) dan terjadi secara seketika, misalnya dalam waktu nol, artinya pensaklaran yang ideal.

⁵ Joseph A Edminister, *Rangkaian Listrik*, Jakarta, Erlangga, 1995, hlm. 63.

Selanjutnya, kita dapat mengindikasikan dua waktu seketika, yaitu waktu seketika tepat sebelum pensaklaran dengan symbol 0^- , misalnya $t = 0^-$, dan waktu seketika tepat setelah pensaklaran dengan symbol 0^+ (atau hanya 0) seperti ditunjukkan oleh gambar.



Gambar 2.10. Kurva Waktu pensaklaran
sebelum pensaklaran (0^-) dan setelah pensaklaran (0^+)

Dalam persamaan matematis, nilai dari $f(0^-)$ adalah batas kiri, dimana t melambangkan nol dari kiri, dan nilai fungsi $f(0^+)$ adalah batas kanan, dimana t melambangkan nol dari kanan. Dengan mengingat hal ini, maka dapat diformulasikan dua hukum pensaklaran, yaitu :

2.1.5.1 Hukum pensaklaran pertama

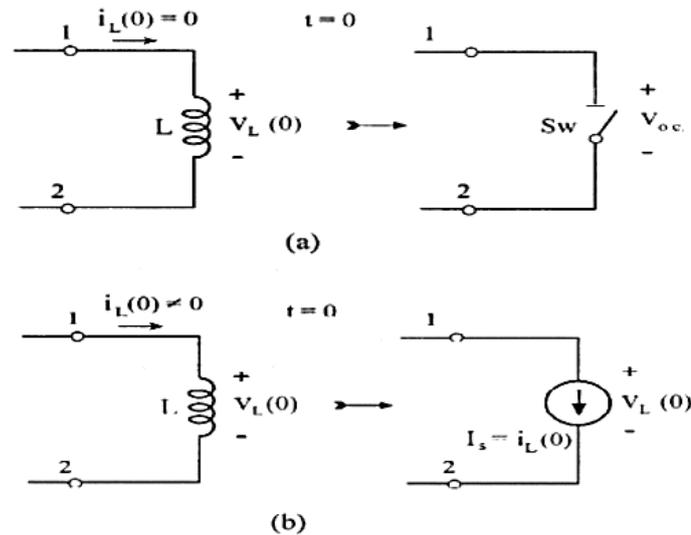
Hukum pensaklaran pertama menyatakan bahwa arus dan fluks magnetik dalam sebuah induktansi tepat setelah pensaklaran $i_L(0^+)$ bernilai sama dengan arus dan fluks dalam induktansi yang sama tepat sebelum pensaklaran.

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\lambda_L(0^+) = \lambda_L(0^-) \dots \dots \dots (2.16)$$

Persamaan di atas menyatakan nilai awal dari arus induktansi dan

memungkinkan kita untuk menemukan konstanta integrasi dari respon natural dalam rangkaian induktansi. Bila nilai awal dari arus induktansi adalah nol maka induktansi pada waktu seketika $t = 0$ adalah ekuivalen dengan sumber arus dimana nilainya adalah nilai awal dari arus induktansi $I_S = i_L(0)$, seperti ditunjukkan oleh gambar 2.11.



Gambar 2.11. Rangkaian ekuivalen untuk induktansi pada $t = 0$, dengan nilai arus awal nol (a); dan dengan arus $I_L(0)$ (b)

Perlu dicatat bahwa pada ekuivalen ini, sumber arus dapat merepresentasikan induktansi dalam cara yang paling umum, juga pada kasus arus yang bernilai awal nol. Pada kasus ini, nilai dari sumber arus adalah nol, dan resistansi dalamnya bernilai tidak terbatas sehingga rangkaian seolah-olah menjadi rangkaian terbuka.

2.1.5.2 Hukum pensaklaran kedua

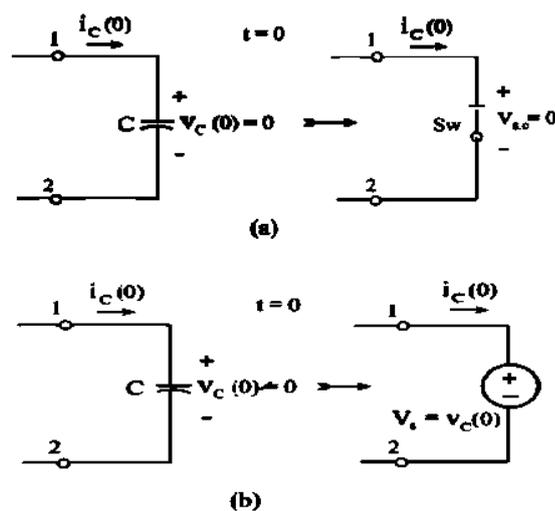
Hukum pensaklaran kedua menyatakan bahwa tegangan dan muatan listrik dalam kapasitansi tepat setelah pensaklaran $v_C(0^+)$ bernilai sama dengan

tegangan dan muatan listrik dalam kapasitansi yang sama tepat sebelum pensaklaran.

$$V_C(0^+) = V_C(0^-) \dots \dots \dots (2.17)$$

$$q(0^+) = q(0^-) \dots \dots \dots (2.18)$$

Persamaan di atas menyatakan nilai awal tegangan kapasitansi dan memungkinkan kita untuk menemukan konstanta integrasi dari respon natural dalam rangkaian yang memuat kapasitansi. Bilai nilai awal tegangan pada kapasitor adalah nol, maka kapasitansi pada waktu seketika $t = 0$ adalah sama dengan rangkaian hubung singkat seperti ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen untuk kapasitansi pada $t = 0$, dengan nilai arus awal nol (a); dan dengan arus $VC(0)$ (b)

Perlu dicatat bahwa ekivalen ini, sumber tegangan yang nilai awalnya adalah nilai awal kapasitansi dalam cara yang paling umum, juga dalam kasus tegangan awal nol. Dalam kasus ini, nilai tegangan adalah nol dan resistansi dalamnya adalah nol. Sumber tegangan dapat digunakan sebagai ekivalen dari kapasitansi dengan nilai tegangan awal nol. Sumber tegangan ini akan menghasilkan tegangan nol tetapi resistansi dalamnya yang nol akan membentuk

sebuah rangkaian hubung singkat. Bila kondisi awal adalah nol, dimana bila nilai awal tidak nol kondisi awal ini akan mulai dari nilai yang sama yaitu tepat sebelum pensaklaran.

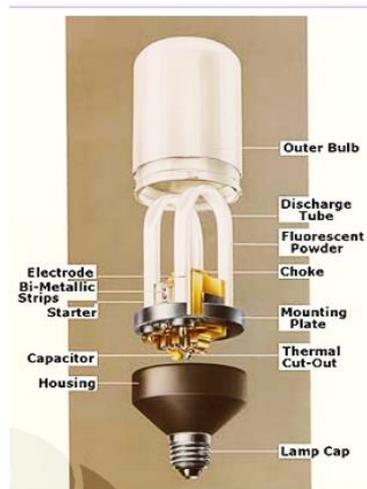
Kondisi awal yang diberikan oleh persamaan (2.15) sampai (2.18), dimana arus melalui induktansi dan tegangan melalui kapasitansi, disebut sebagai kondisi awal independent karena kondisi awal ini tidak terganggu apakah sumber rangkaian atau pada status dari elemen lain dalam rangkaian. Tidak masalah bagaimana kondisi awal ini dibentuk, atau jenis pensaklaran atau interupsi yang terjadi dalam rangkaian.

Elemen-elemen lain dalam rangkaian misalnya tegangan dan arus dalam resistansi, tegangan melalui induktansi, dan arus melalui kapasitansi akan dapat berubah seketika, dan nilainya pada waktu seketika tepat setelah pensaklaran ($t = 0^+$) disebut sebagai kondisi awal dependen. Nilai-nilai ini tergantung pada nilai awal independen dan pada status elemen rangkaian yang lain.

2.1.6 Pensaklaran Lampu Hemat Energi

2.1.6.1 Lampu Hemat Energi

Penggunaan lampu pijar (*incandescent lamp*) saat ini sudah digantikan oleh lampu hemat energi. Lampu hemat energi yang dimaksud adalah lampu jenis *compact fluorescent lamp* (CFL). Keunggulan lampu ini dibandingkan dengan lampu pijar yaitu dengan konsumsi daya yang lebih kecil, tetapi cahaya yang dihasilkan mempunyai tingkat efisiensi yang sama. Sebagai perbandingan, lampu hemat energi dengan konsumsi daya 40 watt mempunyai tingkat efisiensi yang sama dengan lampu pijar 8 watt. Sehingga penggunaan lampu hemat energi dapat menekan biaya tagihan listrik, dengan berkurangnya watt yang digunakan.



Gambar 2.13 Lampu Hemat Energi

Prinsip kerja lampu *fluorescent* ini yaitu menggunakan sistem emisi elektron. Elektron yang bergerak dari katoda menuju anoda pada tabung lampu akan menumbuk atom-atom media gas yang ada di dalam tabung tersebut, akibat tumbukan akan terjadi pelepasan energi dalam bentuk cahaya. Sistem pembangkitan cahaya buatan ini disebut *Luminescence* (berpendarnya energi cahaya keluar tabung).

Untuk dapat mengemisikan elektron diperlukan energi yang cukup besar. Pada lampu pijar, energi untuk mengemisikan elektron didapat dari pemanasan filamen tungsten. Pemanasan filamen terjadi ketika arus mengalir melalui filament tersebut saat lampu dihubungkan dengan sumber tegangan. Sedangkan pada lampu *fluorescent*, jika langsung menggunakan tegangan sumber, maka energi yang ada tidak cukup besar untuk dapat mengemisikan elektron, sehingga digunakan komponen tambahan yaitu *starter* dan *ballast*. Pada lampu hemat energi, komponen *starter* dan *ballast* terintegrasi pada lampu seperti terlihat pada gambar. Jenis *ballast* yang digunakan adalah *ballast* elektronik.

2.1.6.2 Lampu Hemat Energi Recycler (Rekondisi)

Recycler berarti mendaur ulang barang. Jadi Lampu Hemat energy recycler adalah lampu hemat energy yang telah di daur ulang (rekondisi). Ciri-ciri dari lampu rekondisi adalah sebagai berikut:

- a. Lampu tentu terlihat sudah kekuningan tidak bersih dan putih seperti baru.
- b. Terdapat bekas congkelan diantara filamen lampu dengan ballast elektronik.
- c. Tabung lampu agak hitam di ujung karena pemakaian.

Penggunaan lampu recycler ini bias berbahaya bila rekondisi terjadi pada ballast elektronik dengan mengganti komponen dalam ballast tidak sesuai maka dapat mengakibatkan konsleting listrik.

Masa pakai dari lampu recycler ini bergantung pada proses rekondisi itu sendiri. Bila penggantian komponen ballast dengan komponen baru maka bisa bertahan cukup lama yaitu berkisar satu tahun. Tentu saja masih kurang dibanding lampu hemat energy baru yang bisa bertahan 2 sampai 3 tahun.

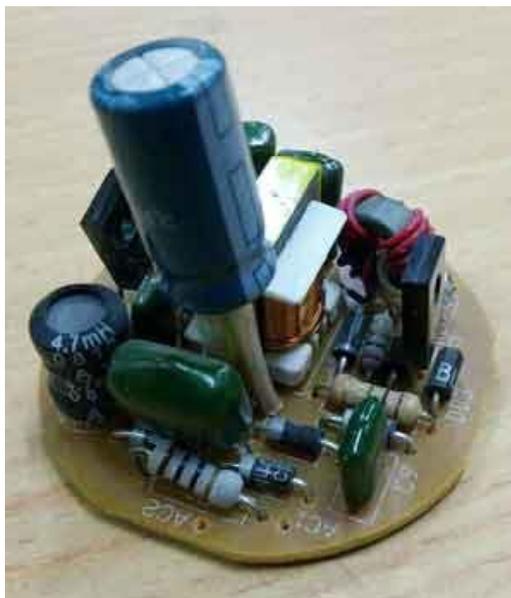
Berikut ini adalah cara merekondisi lampu berdasarkan tiap kerusakan yang dapat dideteksi:

- a. Tanda kerusakan tabung lampu :
 1. Pada salah satu atau kedua ujung filament berwarna hitam,hal ini dikarenakan panas yang berlebih pada filament yang diakibatkan tegangan lebih ataupun usia pakai. Untuk lebih baiknya kita gunakan multimeter untuk mengecek filament.
 2. Tabung lampu retak,kemungkinan dikarenakan jatuh ,terbentur,atau karena panas yang berlebih pada tabung lampu.

b. Tanda kerusakan pada ballast elektronik :

1. Sekring putus, biasanya putus dapat kita tes menggunakan multi tester pada skala 1X, apabila jarum bergerak maka sekring baik.
2. Dioda short, hal ini jarang terjadi untuk mengetesnya kita menggunakan multi tester pada posisi 10X, apabila jarum tidak bergerak maka dioda putus. Bila pengetesan posisi dioda dibolak-balik dan jarum bergerak maka dioda short.
3. capasitor, kerusakan pada umumnya capasitor terlihat menggebu. Cara pengetesan menggunakan multi tester posisi 10X apabila jarum bergerak kemudian kembali ke-posisi nol berarti capasitor baik. Apabila jarum bergerak dan tidak kembali maka capasitor korslet.
4. Resistor, kerusakan biasanya ditandai dengan terlihat terbakarnya resistor. Cara pengetesan dengan multi tester, bila jarum bergerak menunjukkan nilai yang sama dengan nilai resistor maka resistor baik, apabila jarum tidak bergerak maka resistor putus.
5. transistor, biasanya transistor pecah, untuk mengetesnya menggunakan multi tester posisi 10X. Transistor baik jika jarum bergerak apabila basis pada kabel merah dan kolektor atau emitor pada kabel hitam dan jarum tidak bergerak pada saat dites menggunakan multi tester antara kolektor dan emitor.

2.1.6.3 Ballast Elektronik



Gambar 2.14 Ballast dan Starter pada LHE

Ballast elektronik adalah konverter elektronika daya yang fungsinya untuk mensuplai discharge lamp. Ballast elektronik mulai populer setelah berkembangnya mosfet yang berdaya besar dan harga relatif murah. Dengan perkembangan mosfet ini membuat pemakaian ballast elektronik menjadi lebih mudah.⁶

Ballast elektronik banyak digunakan pada lampu hemat energi. Ini dikarenakan ballast elektronik mempunyai keunikan yang khusus, yaitu sistem bekerjanya yang tidak lagi menggunakan kumparan kawat pada inti besi tetapi menggunakan sistem rangkaian elektronik. Hal ini menyebabkan *losses* yang terjadi pada kumparan menjadi hilang, meskipun ada sedikit *losses* karena rangkaiannya.

⁶Faisal Rizka, <https://faisalrizka.wordpress.com/2013/04/01/prinsip-kerja-ballast-elektronik-untuk-lampu-hemat-energi>. Html. Diakses 21 Februari 2013, jam 22.30

Adapun prinsip kerja dari ballast elektronik pada lampu hemat energi adalah:

- Tegangan AC dari PLN akan disearahkan dengan menggunakan *bridge* yang nantinya tegangan tersebut akan disimpan pada kapasitor bank (C). Kapasitor bank ini nantinya akan menjadi sumber tegangan DC untuk lampu hemat energi.
- Untuk mencegah terjadinya tegangan transient dari tegangan masukan PLN maka digunakan filter. Selain itu filter juga berfungsi untuk meredam berbagai sumber noise *electromagnetik interference* yang disebabkan oleh frekuensi tinggi pada tabung lampu hemat energi. Filter ini dapat berupa rangkaian kapasitor maupun induktor.
- Saat rangkaian dihidupkan maka tabung lampu hemat energi akan mempunyai impedansi yang sangat besar. Impedansi ini menyebabkan Kapasitor 1 akan mengalami seri dengan kapasitor 2 dan induktor.
- Tegangan yang sangat besar akan muncul akibat resonansi. Tegangan yang dihasilkan ini dapat digunakan untuk mengionisasi gas yang berada di dalam tabung lampu hemat energi.
- Saat tabung lampu hemat energi mengalami ionisasi penuh, maka impedansi pada lampu akan turun cukup jauh. Hal ini menyebabkan rangkaian harus membuang muatan pada kapasitor 1. Akibat ini pula frekuensi resonansi akan tergeser dengan nilai yang akan ditentukan oleh kapasitor 2 dan induktor.
- Energi yang dipakai tersebut menjadi lebih kecil begitu pula dengan tegangan di antara elektroda menjadi lebih kecil. Kondisi ini akan

mengakhiri kondisi *startup* dari lampu hemat energi ini dan lampu akan menyala.

2.1.7 Arus Inrush Pada Lampu Hemat Energi

Tujuan penggunaan *ballast* elektronik pada lampu hemat energi yaitu untuk membangkitkan tegangan yang tinggi, yang dibutuhkan dalam proses penyalakan lampu. Pada *ballast* elektronik terdapat komponen kapasitor untuk menyimpan energi dengan nilai kapasitansi yang besar. Energi yang tersimpan dibutuhkan untuk membangkitkan tegangan keluaran yang tinggi, yang diperlukan untuk menyalakan lampu. Nilai kapasitansi kapasitor yang besar juga akan menjaga suplai energi bernilai konstan, menghasilkan unjuk kerja yang lebih efisien dan menghilangkan *flicker*.

Ketika operasi penutupan saklar dilakukan, kapasitor pada *ballast* akan membangkitkan tegangan yang tinggi. Dan untuk membangkitkan tegangan yang tinggi ini, kapasitor akan menarik arus yang besar dari sumber. Tarikan arus awal inilah yang disebut arus inrush. Beberapa *ballast* elektronik mempunyai kemampuan untuk membatasi besarnya arus inrush, ada juga yang tidak. Pada pensaklaran lampu hemat energi, pembatasan besarnya arus inrush diperlukan agar *circuit breaker* tidak trip ketika lampu dinyalakan. *circuit breaker* umumnya mempunyai rating untuk arus inrush sebesar 8 sampai 12 kali dari nilai arus normal. Jika besarnya arus inrush tidak dibatasi maka arus inrush ini dapat melebihi rating dari *circuit breaker*, dan akibatnya *circuit breaker* akan trip.

Selain itu, saklar yang digunakan biasanya rentan terhadap fenomena transien saat operasi pembukaan atau penutupan. Dan fenomena arus inrush

transien muncul saat operasi penutupan saklar. Arus inrush yang tinggi dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada kontak saklar dan sering menyebabkan kegagalan fungsi saklar sebagai pemutus rangkaian, yaitu ketika kontak-kontak pada saklar melebur dan menempel sehingga saklar akan terus berada dalam keadaan ON (fungsi saklar sebagai pemutus rangkaian tidak lagi bekerja).

Pada *eksperiment* ini mengukur arus inrush melalui tegangan jatuh pada resistor yang dihubungkan seri dengan LHE. Sehingga didapatkan nilai arus inrush dari nilai tegangan puncak inrush dikalikan dengan faktor koreksi. Dengan mengukur arus *steady state* dengan multimeter yaitu I_{RMS} . Faktor koreksi didapatkan dengan persamaan berikut.⁷

$$F_k = \frac{I_{rms} \times \sqrt{2}}{V_{ps}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dengan:

F_k = faktor koreksi

I_{rms} = arus *steady state* hasil pengukuran dengan multimeter

V_{ps} = Tegangan puncak osiloskop pada *steady state*

Maka, I_{inrush} didapatkan dengan:

$$I_{inrush} = V_{ppi} \times F_k \dots\dots\dots(2.22)$$

Dengan:

V_{ppi} = Tekanan puncak inrush

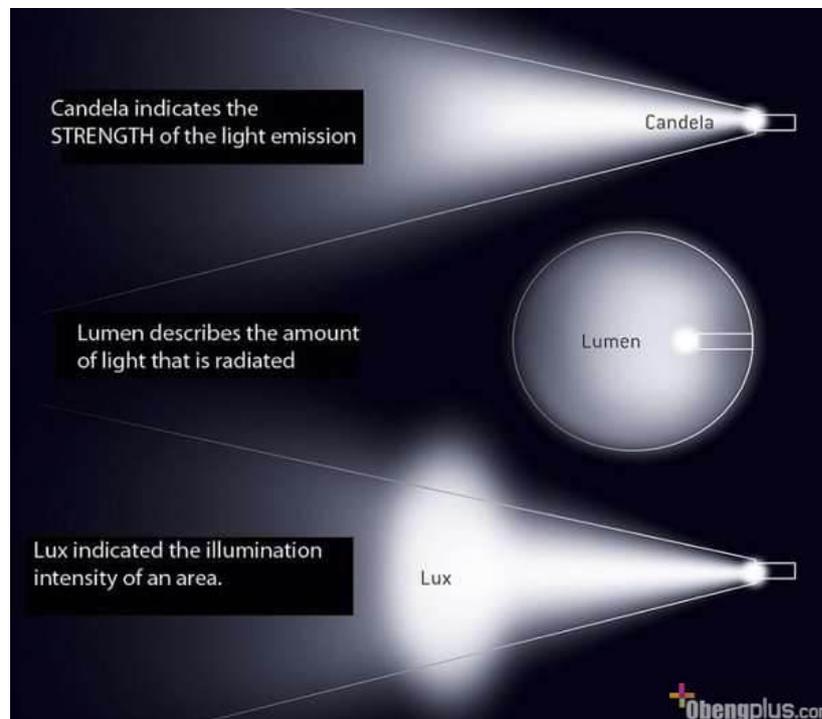
F_k = Faktor koreksi

2.1.8. Kekuatan Cahaya

Apa perbedaan kekuatan cahaya yang dihitung dari *Candela*, Lumen dan

⁷ Dwi Febrianto, Analisis Karakteristik Arus Inrush pada pensaklaran Lampu Hemat Energi[skripsi], Depok,Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,2008,hlm.24.

Lux? Untuk memahami perbedaan kekuatan cahaya ini dapat dilihat dari gambar 2. 29 berikut ini.



Gambar 2.15 Perbedaan Candela, Lumen dan Lux

Candela atau perhitungan satuan cahaya lilin dianggap sebagai angka satuan cahaya dari lampu. Candela dihitung dari kekuatan sinar cahaya seluruhnya. Tidak memasukan hasil angka arah cahaya, dan hasil akhir kekuatan cahaya.

Lumen dihitung kekuatan dari total sumber cahaya. Dan tidak menghitung intensitas lain, hanya di sumber cahayanya saja dengan arah cahaya yang mengarah kesatu sisi. Apakah nantinya lampu akan berbentuk spot beam sehingga terlihat lebih terang, atau menyebar akan terlihat tidak terlalu terang. Tetap angka yang dipakai adalah lumen sebagai angka kecerahan cahaya ke satu bidang yang

di sinari.⁸

Lux adalah satuan metrik ukuran cahaya pada suatu permukaan. Cahaya rata-rata yang dicapai adalah rata-rata tingkat *lux* pada berbagai titik pada area yang sudah ditentukan. Satu lux setara dengan satu lumen per meter persegi.

Lux umumnya sebagai standar lampu rumah. Menghitung penyebaran penerangan dari sebuah cahaya lampu. Tetapi dihitung dengan tingkat rata rata sinar paling kuat, dan tidak memasukan cahaya rendah yang bias. *Lux* lebih mudah digunakan sebagai hasil akhir yang diberikan cahaya lampu. Bukan dilihat dari kekuatan cahaya dari titik sinar lampu.

Pengukuran *lux* pada LHE diambil dari berbagai sudut yaitu 0 , 30, 60, dan 80. Sehingga didapatkan nilai koreksi setiap sudut dengan:

$$\text{Koreksi sudut} = \frac{E - E_0 \cos \theta}{E_0 \cos \theta} \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan :

E = Lux pada sudut θ

E0 = Lux pada sudut 0

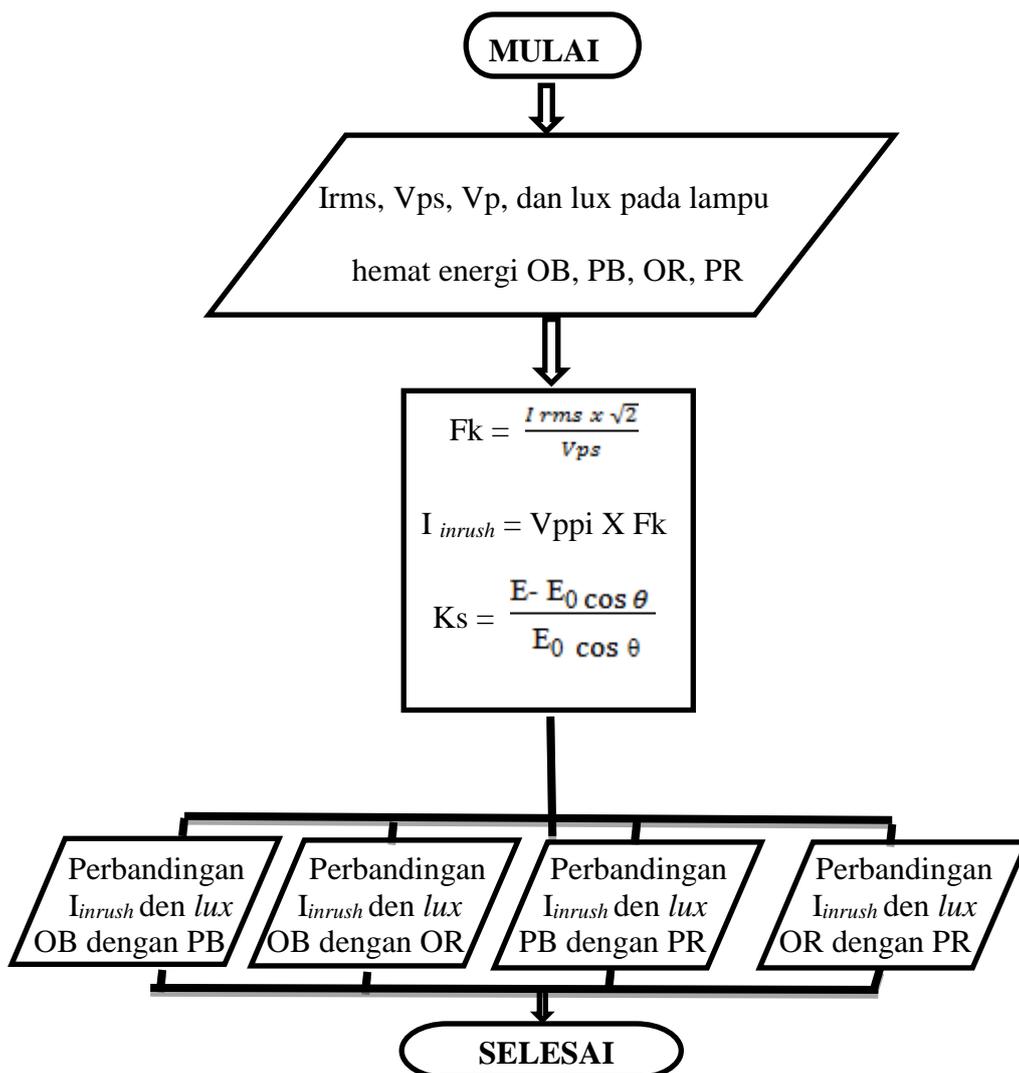
2.2 Kerangka Berpikir

Untuk mendapatkan perbandingan arus inrush dan lux pada LHE recycler Philips 18 watt, recycler Osram 18 watt, baru Phillips 18 dan 18 watt, serta baru Osram 18 watt diperlukan hasil percobaan dari pengukuran arus inrush dari masing-masing lampu. Arus inrush didapatkan pada saat lonjakan tegangan yang pertama kali muncul pada rangkaian saat terhubung dengan beban(lampu LHE).

⁸ *Beda Lumens vs Candela vs Lux dalam cahaya lampu*, <http://obengplus.com/articles/2297/1/Beda-Lumens-vs-Candela-vs-Lux-dalam-cahaya-lampu.html>. Diakses 10 November 2014, jam 00.14

Setiap lampu di rangkai dan dihubungkan dengan sumber. Kemudian dihubungkan dengan osiloskop digital analog. Ketika saklar pertama kali ditutup akan terjaditerlihat gelombang tegangan jatuh (*drop voltage*). Kemudian menghitung faktor koreksi tunak. Setelah tegangan jatuh dikalikan dengan factor koreksi maka didapatkanlah arus inrush pada setiap lampu.

Untuk mengukur lux pada setiap lampu menggunakan lux meter. Dengan menempatkan lux meter di tiga titik tertentu. Kemudian didapatkan nilai lux setiap lampu. Dengan menggunakan persamaan 2.23 bisa mendapatkan koreksi dari setiap sudut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dalam diagram alir berikut.



Keterangan :

OB = Osram Baru

PB = Philips Baru

OR = Osram *Recycler*

PR = Philips *Recycler*

Fk = faktor koreksi

I rms = arus *steady state* hasil pengukuran dengan multimeter

Vps = Tegangan puncak osiloskop pada *steady state*

Vppi = Tekanan puncak inrush

Ks = Koreksi sudut

E = Lux pada sudut θ

E₀ = Lux pada sudut 0