

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sekumpulan dari pusat listrik (pembangkit) dan pusat beban yang secara teratur saling terhubung melalui jaringan transmisi dan distribusi sehingga menjadi satu kesatuan interkoneksi [16]. Dalam sistem tenaga listrik terdiri dari empat unsur, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan penggunaan tenaga listrik (beban). Energi listrik dibangkitkan di pusat tenaga listrik seperti PLTU, PLTA, PLTN, PLTG dan PLTD lalu disalurkan melalui transmisi dengan jarak yang jauh ke pusat-pusat pemakaian tenaga listrik [17]. Dalam sistem tenaga listrik, kehandalan pada peralatan mengacu pada kemampuan alat untuk mampu memberikan pelayanan yang berkesinambungan dan mampu memenuhi kebutuhan listrik. Sistem tenaga listrik dapat dikatakan handal jika memenuhi kecukupan dan keamanan dalam pelaksanaannya [18].

2.2 Kubikel

Panel listrik (kubikel) merupakan seperangkat panel hubung bagi dengan penggunaan tegangan kerja biasanya berkisar antara 6.000 sampai dengan 20.000 Volt. Kubikel terpasang pada gardu induk dengan fungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung, pengontrol dan proteksi pada sistem penyalur tenaga listrik ke pusat-pusat beban, peralatan tersebut dirancang saling terkait antara komponen satu dengan komponen lainnya [19]. Sesuai IEC 298:1990 kubikel dimaksudkan sebagai perlengkapan hubung bagi dan kontrol dengan berbahan logam yang dirakit pabrik untuk menghasilkan arus bolak balik dengan tegangan pengenal diatas 1 kV sampai dengan dan termasuk 35 kV, untuk pasangan dalam dan pasangan diluar, dan untuk frekuensi sampai 50 Hz [20]. Pada kubikel terdapat kompartemen berupa rumah dari terminal penghubung, LBS, PMT, PMS, *fuse*, serta trafo ukur seperti CT dan PT. Hal ini menjadikan kubikel aman untuk disentuh ketika operator kontak langsung dengan bagian-bagian yang bertegangan [21]. Adapun gambar kubikel tertera pada gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Panel Kubikel [22].

Dalam proses penerapannya, kubikel memiliki beberapa jenis dan komponen didalamnya dimana masing-masing jenis tersebut mempunyai fungsi dan peran yang berbeda-beda yang akan dibahas pada subbab berikut.

2.3 Jenis-jenis Kubikel

Berdasarkan nama dan fungsi peralatan kubikel yang terpasang, kubikel digunakan dengan menyesuaikan kebutuhan akan fungsi dalam pengoperasiannya sehingga dalam penempatannya kubikel dapat berjalan dengan baik. Kubikel dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu sebagai berikut.

1. Kubikel *Incoming*

Kubikel *incoming* memiliki fungsi untuk menghubungkan tegangan pada sisi sekunder trafo daya ke busbar 20 kV [23].

2. Kubikel PMT (Pemutus Tenaga)

Kubikel PMT memiliki fungsi untuk membuka dan menutup arus listrik baik dalam keadaan berbeban ataupun tidak berbeban, selain itu dapat memutus ketika terjadi gangguan hubung singkat [24].

3. Kubikel PMS (Pemisah)

Kubikel PMS memiliki fungsi untuk membuka dan menutup aliran listrik 20 kV tanpa adanya beban, hal ini dikarenakan kontak penghubung tidak dilengkapi dengan alat peredam busur listrik [24].

4. Kubikel LBS (*Load Break Switch*)

Kubikel LBS memiliki fungsi untuk membuka dan menutup aliran arus listrik pada kondisi berbeban ataupun tidak. Pada komponen kubikel LBS tidak dilengkapi dengan media pemadam busur api, sehingga diharuskan terdapat ruang yang cukup dan penunjang kabel bagian bawah kubikel untuk melakukan pemasangan terminasi kabel berisolasi padat [24].

5. Kubikel CB *Out Metering* (PMT)

Kubikel *CB Out Metering* memiliki fungsi untuk memutus dan menghubungkan arus listrik dengan cepat ketika dalam keadaan normal ataupun adanya gangguan. Kubikel ini biasa disebut dengan istilah kubikel PMT (pemutus tenaga) yang dilengkapi dengan *relay* proteksi *circuit breaker* (PMT, CB) dan berfungsi juga sebagai alat pembatas, pengukuran dan pengaman [24].

6. Kubikel TP (*Transformer Protection*)

Kubikel TP memiliki fungsi untuk pengaman pada transformator distribusi atau disebut kubikel PB (Pemutus Beban). Kubikel ini terdapat lbs dan *fuse* pengaman trafo dengan beberapa ukuran diantaranya 25 A, 32 A, 43 A [24]. Terdapat dua jenis kubikel TP yaitu:

- a. Kubikel TP dengan *shunt trip*, ketika *fuse* tm putus ada pin pada *fuse* yang dapat menggerakkan mekanik untuk dapat melepas LBS.
- b. Kubikel TP tanpa *shunt trip*, jika *fuse* tm putus maka LBS tidak bisa membuka dan trafo terjadi gangguan dari *fuse* lain yang tidak putus [24].

7. Kubikel PT (*Potensial Transformer*)

Kubikel PT memiliki fungsi sebagai pengukur dimana didalam kubikel ini terdapat pms dan transformator tegangan yang dapat menurunkan tegangan mula 20.000 Volt diubah menjadi 100 Volt untuk mensuplai tegangan pada alat ukur kwh atau disebut kubikel VT (*Voltage Transformer*) [24].

8. Kubikel Terminal *Outgoing* (B1)

Kubikel ini memiliki fungsi sebagai terminal penghubung antara kabel dan pelanggan dimana didalamnya berisi pms dan ketika posisi terbuka maka kontak gerak terhubung dengan pentanahan. Pada kubikel *outgoing* terdapat *Circuit Breaker* (CB) yang digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus listrik sesuai dengan ratingnya [24].

2.4 Komponen-komponen Kubikel

Dalam kubikel komponen disesuaikan dari jenis dan syarat penggunaannya, adapun komponen-komponen yang terdapat pada kubikel antara lain.

2.4.1 Kompartemen

Kompartemen merupakan bagian terpenting pada kubikel dikarenakan kompartemen adalah rumah dari terminal penghubung, LBS, PMT, PMS, *fuse*, trafo ukur, CT, dan PT yang merupakan peralatan mekanis dan instalasi tegangan rendah. Peralatan tersebut dapat mencegah terjadinya bahaya pada operator terhadap adanya sentuhan ke bagian yang bertegangan. Kompartemen berupa lemari atau kotak yang terbuat dari pelat baja terbagi menjadi dua, dimana pada bagian atas difungsikan untuk busbar dan pada bagian bawah berfungsi sebagai penyambung dengan terminasi kabel [25].

Peletakan komponen posisi bawah pada bagian depan merupakan pintu yang dapat dibuka jika tegangan sudah dalam keadaan bebas dan terminasi kabel telah ditanahkan. Pada saat inspeksi rutin biasanya bagian belakang lemari dilepas untuk dilakukan *monitoring*. Komponen didalam lemari disusun secara baik agar tidak mudah terjadinya kerusakan akibat jarak yang berdekatan[25].

2.4.2 Rel/busbar

Komponen busbar adalah komponen yang memiliki fungsi untuk mengumpulkan tenaga listrik dengan tegangan 20 kV kemudian membaginya ke komponen selanjutnya yang diperlukan. Busbar yang berfungsi sebagai rel penghubung pada umumnya berada pada bagian atas kubikel sebagai penghubung antara kubikel satu dengan lainnya. Biasanya pada kubikel jenis RMU (*Ring Main Unit*) pada rel bertegangan 20 kV terdapat didalam tabung SF6 *vacum* [25].

Rel busbar terdiri dari dua bentuk yaitu ada yang bulat dan pipih, bahan dasar dalam pembuatan busbar harus menggunakan tembaga atau aluminium dimana pada busbar yang berbahan aluminium harus dilapisi dengan timah pada titik sambungannya. Selain itu ada busbar yang dilapisi dengan karet silikon yang berfungsi untuk memenuhi ketahanan pada tingkat isolasinya. Bahan pelapis yang digunakan pada busbar merupakan bahan yang tidak mudah terbakar [25].

2.4.3 Kontak Pemutus

Komponen kontak pemutus memiliki fungsi sebagai pemutus ataupun penghubung. Pada kontak pemutus aliran listrik terbagi menjadi dua bagian yaitu kontak gerak (*moving contact*) dan kontak tetap (*fixed contact*) yang memiliki fungsi sebagai peredam busur api. Kontak pemutus pada kubikel jenis LBS dan PMT digunakan dengan media minyak, gas SF₆ *vacum* ataupun dengan udara. Untuk memperkecil terjadinya busur api maka dilakukan pembukaan dan penutupan kontak pemutus secara cepat dan mekanis [25].

PMT berupa saklar digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan arus atau daya listrik sesuai ratingnya. Pada saat dilakukan pemutusan ataupun penghubungan maka arus atau daya listrik akan mengalami busur api listrik. Pemadaman busur api dapat dilakukan dengan bahan minyak, udara, dan gas [25].

2.4.4 Sirkuit Pembumian

Sirkuit pembumian digunakan untuk meletakkan semua bagian yang berbahan logam PHB bermuatan berbahaya yang bukan merupakan bagian dari sirkuit utama atau sirkuit baru untuk dihubungkan kedalam penghantar pembumian. Penghantar sirkuit pembumian terbuat dari tembaga yang mampu mengalirkan arus listrik sebesar 12,5 kA selama 1 detik sehingga tidak menimbulkan kerusakan. Kepadatan arus sirkuit pembumian tidak boleh melebihi batas sebesar 200 A/mm² dan melalui luas penampang penghantar tidak kurang dari 30 mm². Penghantar pembumian dirancang sedemikian rupa untuk memudahkan tangan mencapai terminal kabel. Selungkup kompartemen harus diletakkan secara terselubung pada satu titik dengan penghantar pembumian [25].

Kontinuitas penghantar pembumian pada peletakan didalam kubikel dipasang dengan sekat atau penutup yang dipasangkan melalui pemasangan baut dan mur. Jarak kontinuitas pembumian antara bagian bergerak yang berengsel dengan luas penampang tidak kurang dari 30 mm². Pada penghantar pembumian terdapat penguat yang ditambahkan pada pita dengan tujuan untuk melindungi anyaman pita dari tegangan mekanis yang tidak seharusnya. Bagian sakelar pada penghantar pembumian dihubungkan dengan penghantar utama pembumian melalui penghantar tembaga yang bersifat keras dan fleksibel dengan luas penampang yang tidak kurang dari 30mm² [25].

2.4.5 Pemisah Hubung Tanah

Pemisah (PMS) atau *disconnecting switch* (DS) merupakan komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi sebagai pengaman pada kubikel ketika tidak terdapat tegangan. Pemisah digunakan untuk menyatakan bahwa suatu peralatan listrik sudah bebas dari tegangan kerja. Komponen ini digunakan dengan menghubungkan terminal kabel ke tanah (*grounding*). Terhubungnya terminal kabel ke tanah bertujuan agar *engineers* pada bagian *maintenance* ketika bekerja pada bagian kubikel dapat terhindar dari kegagalan operasi akibat kabel terisi tegangan [25].

PMS tanah pada umumnya memiliki sistem *interlock* pada pintu kubikel dan mekanik LBS, dimana pintu tidak dapat terbuka jika PMS belum masuk, dan LBS tidak dapat masuk sebelum PMS tanah terbuka. Pemisah tanah pada kubikel terletak pada sisi kabel, sedangkan untuk mentanahkan pada sisi rel perlu dilakukan secara manual dengan *grounding* lokal. PMS tanah sisi kabel digunakan untuk membuang sisa muatan listrik [25]. Parameter PMS yang harus diperhatikan yaitu kemampuan mengalirkan arus yang ditentukan oleh besarnya penampang dua batang konduktor, kemampuan tegangan yang dapat dilihat dari kekuatan isolasinya, dan kemampuan menahan arus hubung singkat dimana arus hubung singkat berlipat kali arus nominalnya.

2.4.6 Terminal Penghubung

Sesuai namanya fungsi dari terminal penghubung adalah menghubungkan bagian-bagian kubikel yang memiliki tegangan antara satu dengan lainnya, terminal penghubung terbagi menjadi beberapa bagian antara lain.

- a. Terminal busbar, memiliki fungsi sebagai tempat dudukan busbar
- b. Terminal kabel, memiliki fungsi sebagai tempat menghubungkan kabel *incoming* dan *outgoing*
- c. Terminal PT, memiliki fungsi sebagai penyambung transformator tegangan untuk pengukuran
- d. Terminal CT, memiliki fungsi sebagai penyambung transformator arus untuk pengukuran [25].

2.4.7 Fuse Holder

Komponen *fuse holder* memiliki fungsi untuk menempatkan *fuse* pengamanan pada trafo di kubikel PB dan kubikel PT. *Fuse holder* bekerja dengan menahan sekering listrik. *Fuse holder* didesain dengan berbagai bentuk, disesuaikan dengan masing-masing yang dibutuhkan. Ukuran dan desain pada sekering dirancang langsung dengan jenis dan peringkat arus sekering yang dimaksudkan untuk dipegang [25].

Hampir semua rangkaian listrik akan mengalami peristiwa arus lebih yang berbahaya dan tidak terduga. Dalam keadaan berikut maka diperlukan adanya perlindungan rangkaian arus lebih untuk dapat menangani masalah tersebut dengan baik. Jika dudukan sekering meleleh namun sekering tidak putus secara otomatis, maka masalah terdapat pada dudukan sekering yang tidak melakukan kontak dengan baik dengan sekering. *Fuse holder* terbagi menjadi dua jenis yaitu terbuka dan tertutup sepenuhnya. *Fuse holder* dipasang dengan tiga tujuan utama yaitu dapat mengintegrasikan sekering dengan aman ke dalam sirkuit listrik, menjamin saluran arus kuat, dan memberikan kemudahan dalam mengganti sekering yang telah mengalami penurunan kualitas [25].

2.4.8 Mekanik Kubikel

Komponen mekanik kubikel memiliki fungsi sebagai penggerak dan perubah posisi baik membuka ataupun menutup pada kontak LBS, PMT, dan PMS. Selain itu komponen mekanik kubikel juga berfungsi sebagai pemisah hubung tanah yang dirancang sehingga ketika kontak terbuka dan tertutup pemutus dapat langsung bekerja dengan cepat. Bentuk komponen mekanik kubikel berukuran kecil dan terletak pada bagian samping kubikel yang dapat dijangkau secara langsung oleh tangan [25].

Mekanik kubikel dirancang dengan bentuk desain yang baik dengan tujuan agar dapat memudahkan saat melakukan *maintenance* dalam pengoperasiannya. Ketika arus listrik perlu dialirkan maka mekanik kubikel akan menutup kontak. Sedangkan ketika ingin memutus arus maka kontak akan tertutup. Hal ini dapat memastikan bahwa ketika melakukan *maintenance*, peralatan kelistrikan yang ingin dilakukan *maintenance* dalam keadaan beroperasi atau tidak beroperasi [25].

2.4.9 Lampu Indikator

Lampu indikator akan menyala apabila terdapat arus kapasitif yang dihasilkan oleh kapasitor pembagi. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi dari lampu indikator yaitu untuk menandai adanya tegangan masuk pada sisi kabel baik yang berasal dari sisi lain kabel ataupun dari busbar yang berfungsi sebagai alat penghubung komponen. Dalam pengoperasiannya, biasanya lampu indikator yang terdapat pada kubikel jenis PMT digunakan untuk membedakan posisi alat penghubungnya menjadi dua warna yang berbeda untuk menandai posisi masuk dan keluar [25].

Lampu indikator dapat menyala dikarenakan adanya suplai arus listrik melalui sumber arus searah (DC) yang dihubungkan dengan kontak bantu untuk dapat memproses secara bersamaan melalui sistem kerja poros penggerak alat hubung utamanya. Lampu indikator *on/off* pada PMT digunakan untuk menandai kondisi PMT dalam keadaan *close* atau *open* yang dibedakan dengan dua warna (merah atau hijau). Perbedaan lampu berfungsi untuk mempermudah dalam pengoperasiannya [25].

2.4.10 Pemanas (*Heater*)

Pemanas memiliki fungsi pada umumnya yaitu untuk memanaskan, namun pada komponen kubikel berfungsi untuk memanaskan ruang terminal kabel untuk dapat menjaga kelembabannya tetap dalam keadaan normal. Adanya pemanas ini diharapkan dapat mengurangi terjadinya efek korona yang muncul pada kubikel akibat terdapatnya kelembaban pada komponen kelistrikan, besar tegangan pemanas yang diperlukan dalam memanaskan ruang terminal kubikel yaitu 220 V untuk bisa mendapatkan sumber tegangan dari trafo distribusi [25].

Kelembaban yang terjadi pada komponen kelistrikan akan mengakibatkan terjadinya korona terutama pada terminal kubikel. Terdapatnya korona dapat menyebabkan penurunan kualitas isolasi atau *breakdown*. Apabila terjadi kenaikan tegangan atau arus akibat gangguan, maka akan memudahkan kerusakan pada isolasi yang mengalami penurunan kualitas. Terjadinya kerusakan akibat penurunan kualitas pada alat akan berdampak pada biaya yang berlebih untuk perbaikan alat [25].

2.4.11 *Handle* Kubikel (Tuas Operasi)

Komponen *handle* kubikel memiliki fungsi untuk menggerakkan mekanik kubikel baik membuka dan menutup posisi kontak hubung baik LBS, PMS, PMT dari pemisah pentanahan (*grounding*) atau pengisian pegas untuk energi bisa membuka atau menutup kontak hubung. Penggunaan *handle* kubikel tiap gardu berbeda-beda dikarenakan kubikel yang digunakan juga berbeda dengan gardu lainnya, hal ini bergantung pada produk kubikel yang digunakan. Hal ini disesuaikan dengan bentuk dan fungsi dari masing-masing jenis kubikel [25].

Pemasangan komponen *handle* kubikel di letakkan pada posisi yang mudah dijangkau oleh petugas *maintenance*. *Handle* kubikel dirancang dengan berkesinambungan pada komponen mekanik kubikel dalam pengoperasiannya. Sehingga *handle* kubikel menjadi salah satu komponen utama yang sangat diperlukan pada kubikel [25].

2.4.12 Sistem *Interlock* dan Pengunci

Sistem *interlock* merupakan alat penunjang pada kubikel yang harus memiliki kelengkapan untuk mencegah kemungkinan terjadinya kesalahan atau kelalaian saat operasi dari peralatan serta menjaga keamanan operasi. Perangkat *interlock* harus dirancang dari jenis mekanis sesuai standar pembuatan paling tinggi, hal ini diharuskan dan tidak dapat diganggu gugat karena kekuatan mekanis dari *interlock* harus lebih tinggi dari kekuatan kontrol mekanisnya. Pada kubikel jenis PMT mengharuskan sistem *interlock* juga diberlakukan pada sistem kontrolnya, dimana pada kubikel tersebut terdapat motor listrik sebagai penggerak alat hubung dan dikontrol menggunakan sistem kontrol arus listrik searah [25].

Ketika posisi suatu komponen kubikel belum tepat pada posisinya saat dioperasikan, maka sistem kontrol tidak akan dapat dioperasikan. Adapun macam-macam *interlock* pada kubikel, antara lain.

a. *Interlock* pintu

Pada *interlock* pintu kubikel terjadi dua kondisi, dimana kondisi pertama yaitu kubikel harus tidak dapat dibuka ketika sakelar utama (sakelar tegangan menengah) dalam kondisi tertutup dan sakelar pembumian dalam keadaan terbuka. Kondisi kedua yaitu kubikel harus tidak ditutup jika sakelar pembumian dalam keadaan terbuka.

b. *Interlock* sakelar utama

Pada sakelar utama (sakelar tegangan menengah) harus tidak dapat digunakan jika pintu kubikel berada dalam kondisi terbuka, dan sakelar pembumian dalam keadaan tertutup.

c. *Interlock* sakelar pembumian

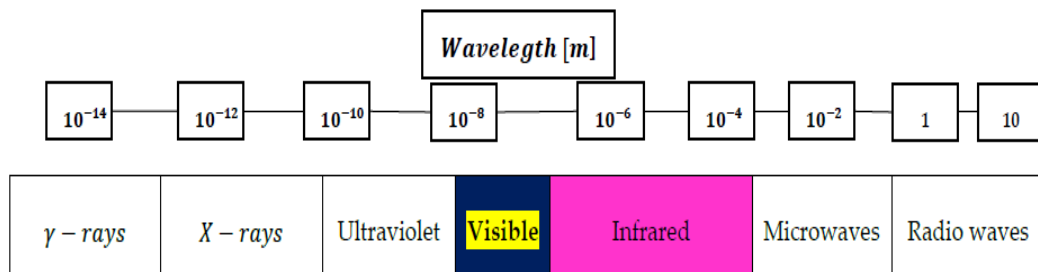
Pada sakelar pembumian harus dalam keadaan tidak tertutup jika sakelar utama dalam keadaan tertutup.

d. Penguncian

Perlengkapan yang harus tersedia pada penguncian yaitu sakelar pembumian dalam posisi terbuka ataupun tertutup, sakelar utama atau pemutusan tenaga dalam keadaan posisi terbuka, dan penguncian untuk pintu kubikel [25].

2.5 *Infrared Thermography*

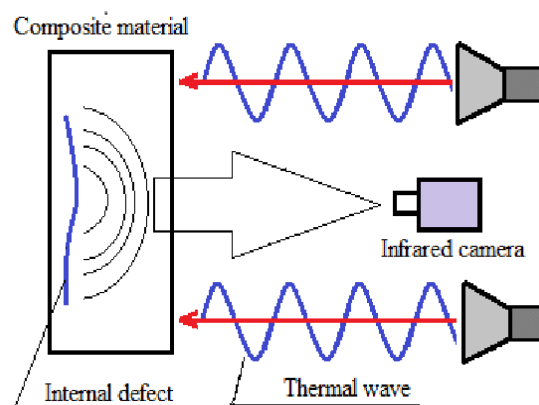
Thermography merupakan suatu teknik dimana gelombang inframerah yang tidak terlihat secara kasat mata, kemudian dipancarkan oleh objek lalu diubah menjadi gambar panas secara visual. Landasan pada *infrared thermography* adalah adanya fenomena bahwa suatu benda yang memiliki suhu diatas nol mutlak ($-273,15^{\circ}\text{C}$) akan memancarkan radiasi gelombang elektromagnetik. Besaran dan komposisi spektrum radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda sangat bergantung dari permukaannya. Menghitung besar intensitas radiasi pada suatu objek benda dapat digunakan untuk menentukan suhu benda tersebut dengan metode tanpa kontak langsung (*non-contact*) [26]. Adapun gambar gelombang inframerah dalam spektrum gelombang elektromagnetik seperti gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik [26].

Pada gambar 2.2 spektrum gelombang elektromagnetik di atas, gelombang inframerah berada pada posisi antara cahaya tampak dan gelombang mikro. Panjang gelombang pada inframerah lebih besar dibandingkan dengan cahaya tampak, hal ini menyebabkan gelombang inframerah bersifat tidak kasat mata. Namun panjang gelombang inframerah lebih kecil dari gelombang mikro, hal ini menyebabkan gelombang inframerah tidak berbahaya jika mengenai tubuh. Gelombang elektromagnetik memiliki sifat pantulan, penyerapan, dan transmisi pada material yang dikenainya sehingga gelombang inframerah dapat dengan mudah diserap oleh berbagai material [26]. Emisivitas setiap objek pada benda didasarkan oleh hukum Kirchoff, dimana tingkat emisi suatu benda atau permukaan akan setara dengan jumlah penyerapan pada panjang gelombang yang sama. Suatu benda hitam (*blackbody*) dikatakan baik apabila pada kondisi penyerapan dan pemantulan mampu menyerap seluruh radiasi panas yang diterima dan dipantulkan kembali. Benda hitam (*blackbody*) memiliki kemampuan untuk menyerap radiasi yang berbanding lurus dengan kemampuan memancarkan radiasi [27].

Teknik *thermography* merupakan penerapan dari penggunaan gelombang inframerah, karena pada penerapan teknik *thermography* menggunakan detektor inframerah. Detektor inframerah berfungsi sebagai penangkap gelombang radiasi panas yang dipancarkan oleh suatu benda, radiasi yang diterima oleh detektor akan diterjemahkan dalam bentuk gambar *thermal* atau *thermogram* melalui sistem yang memproses sinyal pada suatu alat pengukur *thermography* [28]. Adapun skema penerapan teknik *infrared thermography* dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Skema *Infrared Thermography* [28].

Pada gambar 2.3 di atas menunjukkan bahwa teknik *infrared thermography* bekerja dengan cara menangkap radiasi inframerah yang dipancarkan oleh suatu benda lalu divisualisasikan oleh alat *thermal imager* menjadi termogram. Pengaruh terjadinya panas pada suatu benda disebabkan oleh aliran arus listrik yang mengalir secara berkelanjutan sehingga tumbukan oleh pembawa muatan dalam logam mendapat energi dan menyebabkan terjadinya panas dan atom-atom akan bergerak semakin kuat. Hal ini merupakan penerapan dari hukum *Joule* dengan rumus sebagai berikut [29].

$$P = I^2 R \quad (2.1)$$

keterangan:

P: daya (Watt)

I: kuat arus (Ampere)

R: hambatan (Ohm).

Dalam pengujian *infrared thermography*, gejala yang ditimbulkan oleh suatu benda dapat dilakukan dengan menganalisis perbedaan suhu yang dihasilkan dari perbandingan suhu benda yang diamati dengan nilai referensi. Adapun rumus yang digunakan dalam hal ini yaitu sebagai berikut [29].

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (2.2)$$

keterangan:

ΔT : perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

T1: suhu awal ($^{\circ}\text{C}$)

T2: suhu akhir ($^{\circ}\text{C}$)

Pada pelaksanaannya, dalam pengujian menggunakan teknik *thermography* biasa dilakukan minimal sebulan sekali. Namun ketika terjadi kondisi tertentu, maka pengukuran perlu dilakukan sesuai kebutuhan untuk *monitoring* lebih jauh terhadap masalah yang terjadi. Standar yang digunakan dalam menganalisis hasil pengujian *infrared thermography* yaitu dengan menggunakan standar dari NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) yang merupakan organisasi pengembangan standar yang terakreditasi dari ANSI, yang terdiri dari para pemimpin bisnis, pakar listrik, insinyur, ilmuwan, dan teknisi. Adapun standar pengujian *temperature rise infrared thermography* yang digunakan yaitu seperti pada tabel 2.1 berikut [26].

Tabel 2.1 *Temperature Rise* dan Nilai *Standard of Thermography Inspection*
FLIR

<i>Temperature Rise</i> (°C)	<i>Priority</i>	<i>Grade</i>
< 10	Normal	0
10 – 30	Monitor	1
30 – 50	Rencanakan Perbaikan Segera	2
> 50	Perbaikan Segera	3

2.6 Ketidakseimbangan Beban

Sebuah sistem tenaga listrik 3 *phase* yang seimbang adalah sistem dimana tegangan tiap *phase*-nya yang diukur dari *phase* ke netral memiliki besar magnitud yang sama dan memiliki perbedaan sudut *phase* sebesar 120°. Perhitungan persentase ketidakseimbangan beban untuk motor dan generator telah diuji dan menghasilkan batas toleransi maksimum yang diizinkan untuk ketidakseimbangan beban dan tegangan. Berdasarkan standar *National Equipment Manufacturers Association* (NEMA), dimana rekomendasi bahwa motor dapat dioperasikan secara normal pada kapasitas *rated* jika ketidakseimbangan tegangan tidak lebih dari 1%. Adapun rumus ketidakseimbangan beban yaitu sebagai berikut [30].

Besar ketidakseimbangan beban arus, U_I , dinyatakan dengan:

$$U_I = \frac{\text{Deviasi arus phase}}{\text{Nilai rata-rata arus phase}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Besar ketidakseimbangan tegangan, U_V , dinyatakan dengan:

$$U_V = \frac{\text{Deviasi tegangan phase to phase}}{\text{Nilai rata-rata tegangan phase to phase}} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.7 Kamera Inframerah (*Thermal Imager*)

Perangkat dasar yang digunakan untuk mengaplikasikan teknik *infrared thermography* adalah kamera inframerah. Perangkat ini didasarkan dengan detektor yang mampu menangkap energi radiasi inframerah yang dipancarkan oleh objek benda yang dihasilkan dari proses degradasi material peralatan listrik yang menimbulkan panas pada objek benda. Proses ini terjadi akibat adanya optik yang memfokuskan radiasi pada detektor, kemudian dikirimkan data ke sensor elektronik untuk memproses gambar. Sensor ini mampu mengubah data menjadi sebuah gambar yang divisualisasikan dengan monitor standar [31].

Thermal imager digunakan dalam melakukan kegiatan *predictive maintenance* untuk *monitor* kondisi dan keandalan suatu peralatan. *Thermal imager* adalah salah satu alat yang digunakan dalam teknik *thermography* yang menerapkan sistem teknologi *Non-Destructive Testing (NDT) of materials evaluation* atau tanpa menyentuh, hal ini dikarenakan alat tersebut memancarkan sinar inframerah kemudian menangkap kembali radiasi yang dikeluarkan oleh objek yang ingin diukur. Alat ini dalam memonitor peralatan listrik perlu dalam keadaan operasi, karena ketika elektron bergerak akan memberikan kenaikan kemampuan arus listrik yang akan menghasilkan panas terhadap apa yang dilewati elektron tersebut [32].

Thermal imager menunjukkan tinggi atau rendahnya *temperature* berdasarkan skala warna hasil pencitraan (pemotretan objek), ketika tidak terdapat beda *temperature*, maka gambar *infrared* tidak menampilkan perbedaan warna sebagai indikator suhu. Penggunaan alat *thermal imager* bertujuan untuk dapat *monitoring* secara berkala kondisi dan keandalan suatu perangkat listrik. Alat *thermal imager* yang tersedia untuk dapat melakukan pengukuran yaitu Fluke (Ti Series), Satir (D300), dan FLIR *Infrared Cameras* [33]. Adapun kelebihan alat ukur *thermal imager* adalah sebagai berikut.

1. Bisa mengukur tanpa menyentuh objek
 - a. Pengukuran dilakukan pada jarak aman
 - b. Tidak menghambat atau mempengaruhi target yang ingin diukur
2. Pengukuran dilakukan dalam dua dimensi
 - a. Membandingkan antar area pada target
 - b. Gambaran pola panas dapat dianalisa
3. Dilakukan dalam kondisi *real time*
 - a. Dapat memeriksa objek statis
 - b. Dapat melihat objek bergerak
 - c. Dapat melihat perubahan pola panas dengan cepat.

Adapun kekurangan teknik *thermography* dengan alat *thermal imager* antara lain.

1. Pengukuran hanya pada suhu permukaan objek
2. Ketepatan dalam pengukuran belum tentu akurat dan presisi.

2.8 *Software FLIR Thermal Studio*

Software FLIR thermal studio merupakan perangkat lunak untuk analisis dan pelaporan citra termal yang dirancang untuk dapat mengelola sebagian besar gambar dan video *thermal*. Peralatan yang biasa digunakan yaitu dengan kamera *thermal* genggam FLIR, kamera *Optical Gas Imaging* (OGI), dan kamera *thermal Unmanned Aircraft Systems* (UAS). *FLIR thermal studio* memiliki kemampuan dalam pemrosesan dan otomatisasi dengan canggih untuk dapat memperjelas alur kerja dan peningkatan produktivitas. *FLIR thermal studio* dapat digunakan untuk pengukuran, rumusan tingkat lanjut, dan analisis templat khusus untuk termografi profesional dengan seluruh kumpulan foto atau video termal, hal ini berbeda dengan perangkat lunak serupa yang mengharuskan pengguna memproses gambar satu persatu.

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang berjudul *Pemanfaatan Teknologi Infrared Thermography untuk Deteksi Dini Kegagalan Isolasi Jaringan Kabel Listrik UNNES* yang ditulis oleh Kartono, Agus Suryanto, dan Eko Bagus Apriyanto, tahun 2018 membahas mengenai pengukuran kondisi kabel pada panel trafo di Universitas Negeri Semarang. Penelitian ini menggunakan metode *thermography* dengan analisa secara kualitatif untuk melihat peta pola panas yang terdapat pada titik panas, dan kuantitatif untuk melihat nilai *range temperature* peta pola panas terukur yang terdapat pada alat kamera thermal Fluke Ti32. Data yang diperoleh baik pada data primer ataupun sekunder dianalisis dengan menggunakan *software SmartView* yang khusus untuk membaca data gambar [14].

Penelitian yang berjudul *Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine Learning Approach* ditulis oleh Irfan Ullah et al., tahun 2018 membahas langkah awal yang dilakukan dalam pencegahan kerusakan pada gardu listrik dengan dengan melakukan *monitoring* komputer yang memanfaatkan data berupa gambar *thermal* (*thermograms*). *Thermograms* diambil melalui kamera inframerah tanpa mengganggu operasi kerja alat karena pengujian dilakukan tanpa menyentuh objek dalam menganalisa cacat pada peralatan kelistrikan [7].

Penelitian yang berjudul Pemantauan *Thermography* Inframerah Dalam Pemeliharaan Instalasi Listrik Fasilitas Sarana Dukung IEBE ditulis oleh Ahmad Paid, dkk., tahun 2018 membahas proses *scanning* permukaan seluruh panel dengan teknik *thermography* inframerah untuk menentukan titik panas (*hotspot*) yang terindikasi. Terjadinya *hotspot* perlu dilakukan perbaikan sehingga sistem yang mengalami kerusakan dapat bekerja kembali pada temperatur normal [15].

Penelitian yang berjudul Evaluasi Citra Kerusakan pada Panel Distribusi Listrik Tegangan Rendah Berdasarkan Termografi Inframerah ditulis oleh Slamet Wahyudi, dkk., tahun 2019 membahas mengenai sering ditemukan terjadinya kesalahan interpretasi saat citra kamera *thermal* yang dihasilkan diolah lebih lanjut. Penelitian ini memperkenalkan metode pengoperasian dan pengambilan citra *thermal* dengan menggunakan kamera inframerah sesuai standar prosedur operasi yang benar sehingga dapat meminimalisir kesalahan interpretasi yang berdampak pada keputusan dan tindakan perbaikan [9].

Penelitian yang berjudul Karakteristik Penyebaran Panas pada Sistem Transmisi Roda Gigi dengan Termografi ditulis oleh Ali Mahmudi dan Parno Raharjo, tahun 2020. Penelitian ini membahas pengukuran termografi untuk memindai penyebaran panas pada komponen utama sistem transmisi roda gigi selama 120 menit. Hasil penelitian ditemukan bahwa kenaikan temperatur tertinggi terjadi pada badan motor penggerak, kemudian kopling, bantalan sisi penggerak, bantalan kotak roda gigi sisi penggerak, dan bantalan kotak roda gigi sisi non penggerak [12].