

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian tentang transformator diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Emil Sabillah Al Choiri [4] dalam penelitian tugas akhirnya yaitu menganalisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTU Cilacap. Pengumpulan data diperoleh dari unit 1 dan 2 PT. Sumber Segara Primadaya sebagai bahan untuk analisis penulisan tugas akhir yaitu berupa data *single line* diagram dan data pembebanan yang dilayani oleh transformator 20 kV/150 kV. Pada unit 1 nilai efisiensi dari transformator setiap jamnya selama 24 jam, terhitung mulai dari pukul 01:00 sampai dengan 24:00 tanggal 2 oktober 2017. Nilai efisiensi terkecil ada pada beban 215,154 MW dengan nilai 92,17% untuk unit 1 dan beban 217,041 MW dengan nilai efisiensi 94,62% setelah dilakukan perhitungan sebanyak 24 kali, nilai efisiensi terbesar ada pada beban 293,514 MW dengan nilai 99,88% untuk efisiensi transformator unit 1 dan pada beban 177,973 MW dengan nilai 99,75% untuk efisiensi transformator unit 2. Nilai efisiensi yang baik adalah 100% namun karena timbulnya rugi-rugi inti yaitu rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy membuat nilai efisiensi pada transformator kurang dari 100%, rugi-rugi tersebut mengalami perubahan menjadi panas. Nilai rata-rata efisiensi selama 24 jam pada tanggal 12 Oktober 2017 sebesar 98,18% pada unit 1 dan 98,71% pada unit 2 dapat disimpulkan bahwa persentase rata-rata efisiensi terhadap pembebanan berkisar di atas 98%, timbulnya rugi rugi pada inti besi sangat mempengaruhi kinerja dari suatu transformator itu sendiri, semakin turun nilai efisiensi dari suatu transformator maka daya yang dihasilkan oleh belitan sekunder juga semakin menurun.

Irwan Nas [5] dalam penelitian tugas akhir yaitu menganalisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi PT.PLN (Persero) Rayon Jeneponto. Dari analisis yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa transformator yang ada di Sulawesi Selatan khususnya pada Rayon Jeneponto dalam keadaan tidak seimbang, hal ini dapat diketahui berdasarkan hasil pengukuran arus pada masing-

masing fasa. Jika arus yang mengalir di masing-masing fasa berbeda, maka beban dalam keadaan tidak seimbang. Hal ini merujuk pada di mana arus yang mengalir mempunyai fasa yang berbeda. Arus yang mengalir di fasa R, S, dan T berbeda baik itu siang hari dan malam hari, berdasarkan ini dapat dikatakan bahwa beban transformator dalam keadaan tidak seimbang dan ketidakseimbangan lebih besar terjadi pada malam hari, beban puncak terjadi pada malam hari yaitu sebesar 28,84%. Ketidakseimbangan beban rata-rata terjadi pada malam hari sebesar 2,99 dan persentase ketidakseimbangan beban sebesar 34,66%. Dari hasil tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa transformator distribusi yang ada di PT PLN (Persero) Rayon Jeneponto dalam keadaan tidak seimbang karena arus yang mengalir di masing-masing fasa berbeda, dan ketidakseimbangan beban lebih besar terjadi pada siang hari, di mana pada persentase ketidakseimbangan beban transformator pada siang hari adalah 36,44 %.

Wahyu Hidayat [6] dalam penelitian tugas akhir yaitu menganalisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator di PLTA Wonogiri. Pengumpulan data diambil langsung di PLTA Wonogiri, data yang diambil antara lain yaitu tegangan, beban, arus, rugi inti dan rugi tembaga. Setelah dilakukan pengumpulan data selama 24 jam, data yang sudah di kumpulkan kemudian dihitung untuk mengetahui nilai efisiensi pada transformator tersebut. Kemudian hasil yang sudah didapatkan akan dilakukan analisa. Dari penelitian didapat bahwa, pada transformator utama baik saat beban tertinggi ataupun saat beban terendah dapat mempengaruhi nilai efisiensinya, walaupun nilainya tidak terlalu signifikan, yang dapat mempengaruhi efisiensi merupakan rugi-rugi transformator itu sendiri. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa persentase rata-rata efisiensi dalam 24 jam 99%, nilai efisiensi dapat di pengaruhi oleh rugi-rugi tembaga yang di sebabkan oleh perubahan beban.

Gasik Prasetyo [7] dalam penelitian tugas akhir yaitu menganalisis pengaruh pembebanan terhadap umur transformator daya di PT PJB Muara Karang dengan menggunakan metode montsinger. Pengumpulan data diambil langsung di PT PJB Muara Karang. Hasil penelitiannya di mana faktor pembebanan pada transformator sangat berpengaruh pada temperatur belitan, semakin besar pembebanan maka semakin

besar pula temperatur belitan dan begitu juga sebaliknya. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan pada 3 unit transformator daya menunjukkan hasil bahwa transformator 140 MVA beroperasi tahun 1992 mengalami penyusutan selama 24 jam 70,42% dengan perkiraan sisa umur 11,73 tahun. Transformator daya 140 MVA beroperasi tahun 2000 mempunyai beban siang 73,89% dan beban malam 76,45% dan sisa umur 7,89 tahun. Transformator daya 140 MVA beroperasi tahun 1994 mengalami penyusutan selama 24 jam 53% dengan perkiraan sisa umur 13,21 tahun.

Priyo Utomo [8] dalam penelitian tugas akhirnya yaitu menganalisis kualitas transformator daya gardu induk 150 kV Siantan. Data di dapatkan dengan melakukan pengukuran beban transformator daya, suhu minyak transformator, suhu kumparan dan suhu lingkungan. Dari data tersebut dilakukan perhitungan persentase beban transformator, rasio pembebanan, kemudian menghitung kenaikan temperatur *top oil* dan temperatur kenaikan *hot spot* pada saat keadaan beban stabil dan beban berubah. Kemudian menghitung laju penuaan thermal relatif, menghitung nilai susut umur transformator daya GI 150 kV PLTD Siantan dan kemudian menghitung perkiraan umur transformator. Dari penelitian tersebut didapat kesimpulan bahwa susut umur transformator di pengaruhi oleh isolasi belitan dan minyak transformator yang diakibatkan oleh pembebanan transformator dan suhu lingkungan sekitar. Berdasarkan penjelasan hasil analisa dapat dinyatakan bahwa transformator daya khususnya transformator daya pada 150 kV Siantan dalam kondisi layak pakai dengan sisa umur yaitu sebesar $\geq 286,98$ tahun pada beban tidak stabil dengan rata-rata pembebanan 17,32%. Sisa umur yang lama (sekitar 286,98 tahun) adalah akibat transformator daya dengan beban nominal 60 MVA tetapi dibebani hanya sekitar 9,768 MW (sekitar 17,32%).

Dari beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan maka pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi dan umur transformator pada pembangkit listrik tenaga uap di Bengkayang 2 x 50 MW.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian PLTU

PLTU adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit ini memiliki ketel uap atau biasa disebut *boiler* yang berfungsi memanaskan air menjadi uap *superheat* atau uap bertemperatur dan bertekanan tinggi yang digunakan untuk memutar suhu-suhu pada turbin. Suhu-suhu pada turbin yang berputar akan memutar poros turbin yang dihubungkan dengan poros generator, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Seperti yang kita ketahui bahwa generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik (poros turbin yang berputar) menjadi energi listrik yang nantinya akan disalurkan langsung ke gardu induk melalui transformator. PLTU pada umumnya menggunakan bahan bakar minyak dan batu bara. PLTU yang menggunakan minyak sebagai bahan bakarnya memiliki gas buang yang relatif bersih dibandingkan dengan PLTU yang menggunakan batu bara. PLTU batu bara lebih cocok dipakai pada wilayah yang memiliki kandungan batu bara yang banyak seperti Kalimantan dan Sumatera. Pada pembangkitan energi Listrik terdapat tiga komponen yaitu turbin uap, generator, dan transformator [10].

- Turbin Uap

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengkonversi energi panas yang terkandung oleh uap menjadi energi putar (energi mekanis) [10].

- Generator

Hampir semua energi listrik dibangkitkan dengan menggunakan generator sinkron. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik [10].

- Transformator

Transformator adalah suatu alat yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet [10].



Gambar 2.1. PLTU Site Baru Bengkayang

Sumber: PLTU Bengkayang 2 x 50 MW

2.2.2 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menaikkan tegangan listrik dari tegangan rendah ketegangan tinggi dan begitu juga sebaliknya, yang dengan sendirinya juga menaikkan daya listrik yang akan disalurkan [9]. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik [10].

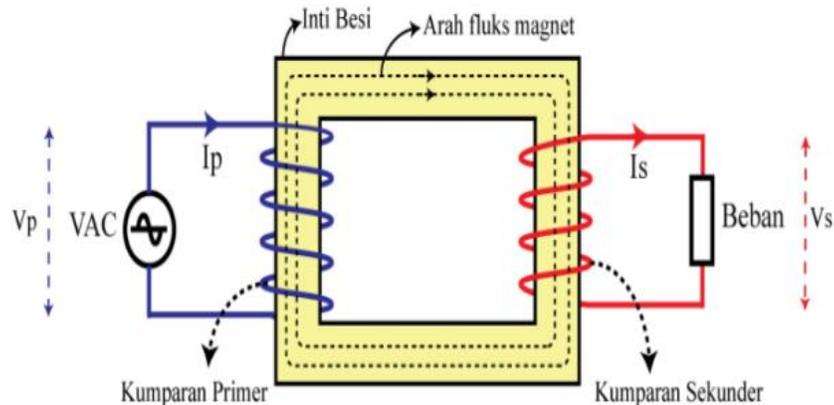


Gambar 2.2. Transformator [2]

2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah, akibatnya pada sisi primer terjadi induksi. Sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula, maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan [10].

Sebuah transformator sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Pada kebanyakan transformator, kumparan ini dililitkan pada sebuah inti. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.3. Prinsip Kerja Transformator [10]

Apabila kumparan primer dihubungkan pada sumber tegangan yang bolak-balik, maka fluks bolak-balik ini akan muncul di dalam inti (*core*) dan membentuk jaringan tertutup (*close loop*), maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks kumparan primer, maka di kumparan primer terjadi *self induction*. Selain itu juga terdapat *mutual induction* sehingga menyebabkan munculnya fluks magnet pada kumparan sekunder [11].

2.2.4 Jenis-Jenis Transformator

2.2.4.1 Jenis Transformator berdasarkan kumparan

Transformator dapat dibedakan berdasarkan kumparannya menjadi 3 yaitu:

- Transformator satu belitan

- Transformator dua belitan
- Transformator tiga belitan

Transformator satu belitan adalah transformator yang mana lilitan primernya merupakan bagian dari lilitan sekunder atau sebaliknya, transformator satu belitan ini lebih dikenal sebagai “ototransformator (*autotransformer*)”. Transformator dua belitan adalah transformator yang mempunyai dua sisi yaitu sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah, di mana kumparan sekunder dan primer berdiri sendiri. Transformator tiga belitan adalah transformator yang mempunyai belitan primer, sekunder dan tersier, masing-masing berdiri sendiri pada tegangan yang berbeda [12].

2.2.4.2 Transformator berdasarkan fungsi

Berdasarkan fungsinya transformator dibagi menjadi beberapa macam yaitu :

a) Transformator Daya

Transformator daya adalah transformator yang digunakan untuk pemasok daya, transformator daya mempunyai dua fungsi yaitu menaikkan tegangan listrik (*step-up*) dan menurunkan tegangan listrik (*step-down*). Transformator daya tidak dapat digunakan langsung untuk menyuplai beban, karena sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tegangan tingginya merupakan tegangan transmisi. Transformator berfungsi sebagai *step-up* pada sistem dimana tegangan keluaran lebih tinggi dari pada tegangan masukan (misalnya pada pengiriman/penyaluran daya) dan sebaliknya transformator berfungsi sebagai *step-down* jika tegangan keluaran lebih rendah daripada tegangan masukan misalnya menerima/mengeluarkan daya [11].

b) Transformator Distribusi

Transformator distribusi pada dasarnya sama dengan transformator daya, bedanya adalah tegangan rendah pada transformator daya bila dibandingkan dengan tegangan tinggi transformator distribusi masih lebih tinggi, kedua tegangan pada transformator distribusi merupakan tegangan distribusi yaitu untuk distribusi tegangan menengah (TM) dan distribusi tegangan rendah (TR). Transformator distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik langsung ke pelanggan [11].

c) Transformator Ukur

Pada umumnya transformator ini digunakan untuk mengukur arus (I) dan tegangan (V), transformator ini dibuat khusus untuk mengukur arus dan tegangan yang tidak mungkin bisa diukur langsung oleh *Amperemeter* atau *voltmeter* [11].

d) Transformator Elektronik

Transformator ini prinsipnya sama seperti transformator daya, tapi kapasitas daya reaktif sangat kecil. yaitu kurang 300 VA yang digunakan untuk keperluan pada rangkaian elektronik [11].

2.2.5 Perangkat - perangkat transformator

2.2.5.1 Kumparan

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut di isolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat, seperti karton, pertinax dan lain-lain. Umumnya pada transformator terdapat kumparan primer dan skunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan atau arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian skunder diberi beban maka akan mengalir arus pada kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus [12].

2.2.5.2 Inti

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan atau plat-plat tipis dari campuran besi khusus yang berisi sedikit silikon. Laminasi-laminasi saling terisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh "*Eddy Current*", dan dijepit secara kuat agar tidak terjadi getaran-getaran [12].

2.2.5.3 Minyak transformator

Sebagian besar transformator daya, kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak transformator, terutama transformator daya berkapasitas besar, karena minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi [12].

Untuk itu minyak transformator harus memenuhi syarat sebagai berikut :

1. Memiliki kekuatan isolasi yang tinggi.
2. Penyalur panas yang baik dan memiliki berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Memiliki viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi sehingga pendingin menjadi lebih baik.
4. Memiliki titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi yang padat.
6. Memiliki sifat kimia yang stabil.
7. Tidak bereaksi secara kimiawi dengan logam dan bahan isolasi [12].

2.2.5.4 Bushing transformator

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah bushing, yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator [12].

2.2.5.5 Tangki dan konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaiian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator. Konservator senantiasa berisi sebagian minyak, guna menjamin bahwa tangki transformator berisi minyak penuh dan juga membantu menghindari absorpsi kelembaban dari atmosfer oleh minyak tangki [12].

2.2.5.6 Pendingin transformator

Panas yang timbul pada belitan maupun inti transformator pada saat transformator dibebani tidak boleh berlebihan karena dapat merusak dan menurunkan tahanan isolasi belitan. Untuk mengatasi agar panas yang timbul tidak berlebihan maka digunakan minyak pendingin transformator. Selain sebagai pendingin, minyak pendingin transformator juga berfungsi sebagai isolator. Selain itu pendinginan transformator juga terjadi secara alami, yaitu berupa udara di sekitar transformator tersebut. Menurut jenis pendingin nya, Transformator dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu *Dry Type Transformer* dan *Oil-immersed transformer* [3].

- *Dry Type Transformer*

Transformator jenis ini paling mudah dalam pengoperasiannya, karena sistem pendingin secara alamiah memanfaatkan udara di sekitar transformator sehingga tidak memerlukan biaya dalam perawatan [13].

- *Oil-Immersed Transformer*

Pada transformator ini terbagi atas dua macam :

1. *Natural cooling* : Pendingin ini bekerja sendiri dan hanya dibantu dengan pemasangan radiator untuk sirkulasi minyaknya.

2. *Air blast cooling* : Pendingin ini dibantu dengan pemasangan radiator dan kipas angin (*blower*) [13].

2.3 Efisiensi transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya listrik yang keluar dari transformator (*out*) dengan daya listrik yang masuk pada transformator (*in*), transformator yang ideal efisiensinya 100% akan tetapi pada kenyataannya efisiensi transformator kurang dari 100%. Hal ini dikarenakan rugi-rugi yang telah dijelaskan di atas sehingga energi listrik menjadi energi panas atau gerak. Efisiensi transformator dinyatakan dalam persamaan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$P_{in} = P_{gen} - (P_{gen.ext} + P_{uat}) \quad (2.2)$$

atau

$$P_{in} = P_{out} + \text{Rugi-rugi} \quad (2.3)$$

jadi,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{rugi-rugi}} \times 100\% \quad (2.4)$$

di mana,

P_{gen} = Daya Generator (MW)

$P_{gen.ext}$ = Daya untuk eksitasi generator/ *Generator excitation power (MW)*

P_{uat} = Daya Unit *auxiliary Transformer*

		Transformator Bantu (MW)
η	=	Efisiensi (%)
P_{in}	=	Daya masuk (MW)
P_{out}	=	Daya keluar (MW)
Rugi-rugi	=	Rugi tembaga + rugi inti (MW)

2.4 Perhitungan Umur Transformator

Temperatur top oil tergantung pada kondisi suhu sekitar yang dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\theta_0 = \left[\frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \times \Delta\theta_{or} \quad (2.5)$$

Dengan,

K = faktor beban

R = Rasio rugi-rugi

$\Delta\theta_{or}$ = kenaikan temperatur *top oil*

Untuk menentukan selisih antara temperatur *top spot* dengan temperatur *top oil* dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\Delta\theta_h = k_{21}^x K^y \times \Delta\theta_{hr} \quad (2.6)$$

dengan,

K = Faktor beban

k_{21} = Konstanta

$\Delta\theta_{hr}$ = Gradien *hot spot* ke *top oil* (dalam tangki)

y = Eksponen belitan

$$\theta_h = \theta_o + \Delta\theta_h$$

(2.7)

dengan,

θ_o = Temperatur *top oil*

$\Delta\theta_h$ = Selisih temperatur *hot spot* dan *top oil*

Sebagai pedoman untuk perhitungan temperatur *hot spot* dan *top oil*, diberikan karakteristik termal dari transformator dengan jenis pendingin ONAN pada tabel 2.1

Tabel 2.1

Karakteristik termal untuk perhitungan pembebanan transformator “ONAN”

Uraian	ONAN
Ekspone Minyak (x)	0,8
Ekspone Belitan (y)	1,6
Rasio Rugi-Rugi (R)	5
Temperatur <i>Hot Spot</i> (θ_h)	98
Gradient <i>Hot Spot to Top Oil</i> (Dalam tangki) ($\Delta\theta_{hr}$)	23
Kenaikan Temperatur <i>Top Oil</i> ($\Delta\theta_{or}$)	55
K_{21}	1

Pendistribusian suhu pada transformator yang tidak seragam menyebabkan suhu tertinggi akan mengalami penurunan isolasi paling besar sehingga akan berpengaruh terhadap laju penuaan. Laju penuaan relatif (V) ditentukan pada persamaan 2.8.

$$v = 2^{(\theta^h - 98)/6} \quad (2.8)$$

dengan,

θ^h = Temperatur *hot spot*

Pengaruh penurunan isolasi belitan tanpa mempertimbangkan pengaruh yang lainnya dapat mengakibatkan pengurangan umur pada transformator, dapat ditentukan pada persamaan 2.9.

$$L = \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \quad (2.9)$$

dengan,

V_n = Laju penuaan relatif selama interval ke-n

t_n = Interval waktu ke-n

n = Nomor pada tiap interval waktu ke-n

N = Jumlah nomor selama periode interval

L = Sisa umur dalam satuan jam perhari

Untuk mengetahui nilai sisa umur transformator dalam tahun makan perlu mengkalikan dengan 365 hari dan umur dasar transformator adalah 20 tahun sesuai

standar IEC (*International Electrotechnical Commission*) [13], ditunjukkan pada persamaan 2.10

$$Sisa\ umur = \frac{8760 - (L \times 365)}{8760} \times (20 - \text{Tahun Operasional}) \quad (2.10)$$

dengan, 8760 adalah konversi satuan jam per tahun [14].