

Monitoring Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Berbasis Teknologi *Internet of Things*

Osea Zebua¹, Endah Komalasari², Syaiful Alam³, Aldiansyah⁴

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung¹

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung²

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung³

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung⁴

*osea.zebua@eng.unila.ac.id¹, endah.komalasari@eng.unila.ac.id, syaiful.alam@eng.unila.ac.id, aldi.kicuy@gmail.com

ABSTRACT

Unbalanced load is one of the causes of unpredictable distribution transformer failure, so it is necessary to monitor the unbalanced load condition of the distribution transformer. Internet of things (IoT) technology-based equipment supports remote monitoring needs. This paper presents the monitoring of unbalanced load in distribution transformer based on IoT technology. The ZMPT101B voltage sensor and SCT019 current sensor are used to measure the rms voltage and current in each phase, the Arduino microcontroller is used to process the measurement data and send it to the network server via an ethernet shield and a wifi router equipped with an internet modem. The results showed that the monitoring equipment based on IoT technology was able to work to monitor unbalanced load online so that it could be monitored remotely via device connected to the internet network.

Keywords: *Unbalanced Load Monitoring, Distribution Transformer, Internet of Things, Monitoring Equipment.*

INTISARI

Ketidakseimbangan beban merupakan salah satu penyebab kegagalan transformator distribusi yang tidak dapat diprediksi, sehingga monitoring kondisi ketidakseimbangan beban dari transformator distribusi perlu dilakukan. Peralatan berbasis teknologi *internet of things* (IoT) mendukung monitoring dari jarak jauh. Makalah ini menyajikan monitoring ketidakseimbangan beban transformator distribusi berbasis teknologi IoT. Sensor tegangan ZMPT101B dan sensor arus SCT019 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus rms di setiap fasa, mikrokontroler Arduino digunakan untuk memproses data hasil pengukuran dan mengirimkannya ke server jaringan melalui ethernet shield dan wifi router yang dilengkapi dengan modem internet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peralatan monitoring berbasis teknologi IoT mampu bekerja untuk memonitoring ketidakseimbangan beban secara online sehingga dapat dimonitor dari jarak jauh melalui perangkat yang terhubung ke jaringan internet.

Kata kunci: Monitoring Ketidakseimbangan Beban, Transformator Distribusi, Internet of Things, Peralatan Monitoring.

I. PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan peralatan listrik yang sangat penting. Transformator distribusi mengkonversi besaran tegangan dan arus dari jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV sehingga dapat digunakan pada jaringan tegangan rendah 220V/380V dimana banyak beban-beban listrik konsumen terhubung. Peralatan-peralatan instrumentasi atau pengukuran hanya terdapat pada sebagian kecil transformator distribusi dan hanya digunakan untuk

mengukur besar pemakaian daya listrik dari transformator distribusi tersebut. Selain itu, operator listrik hanya dapat melihat besaran hasil pengukuran di lapangan dan tidak dapat melihat dari tempat lain yang jauh dari lokasi transformator distribusi.

Kerusakan-kerusakan yang terjadi pada transformator distribusi biasanya disebabkan oleh beberapa hal, antara lain pembebanan berlebih, gangguan saluran, surja pensaklaran atau petir, ketidakseimbangan beban, kebocoran minyak, lepasnya hubungan dari saklar di bushing, pentanahan

yang tidak baik, dan pemeliharaan yang tidak baik. Pembebanan berlebih dan ketidakseimbangan beban menyumbang 45% dari penyebab kerusakan dan kegagalan dari transformator distribusi [1]. Pembebanan yang berlebihan dan ketidakseimbangan beban atau arus yang mengalir pada setiap fasa dapat meningkatkan panas pada konduktor sehingga menyebabkan isolasi transformator mengalami degradasi atau penurunan fungsi kerja. Alat proteksi yang terdapat pada transformator distribusi hanya bekerja bila arus yang mengalir melebihi kapasitas nilai ratingnya, namun kerusakan isolasi akibat ketidakseimbangan beban tidak dapat diantisipasi oleh alat proteksi tersebut. Selain itu, ketidakseimbangan beban juga dapat menyebabkan kenaikan nilai tegangan netral ke tanah, jika pentanahan transformator distribusi tidak baik.

Monitoring besaran-besaran listrik dan ketidakseimbangan beban dari transformator distribusi perlu dilakukan setiap waktu untuk menghindari kerusakan-kerusakan dan kegagalan transformator distribusi. Monitoring dapat dilakukan dari tempat lain yang jauh dari lokasi transformator distribusi. Perkembangan teknologi komunikasi dan informasi memungkinkan monitoring transformator distribusi dari jarak jauh dan tanpa kabel. Selain itu, data monitoring dapat disimpan dan ditampilkan secara *online* sehingga monitoring besaran-besaran listrik dan ketidakseimbangan beban serta prediksi “kesehatan” transformator distribusi dapat dilakukan.

Makalah ini menyajikan teknik monitoring ketidakseimbangan beban transformator distribusi menggunakan teknologi internet of things. Data ketidakseimbangan beban dihitung berdasarkan data pengukuran tegangan dan arus dan kemudian dikirim ke *server* di jaringan internet melalui Ethernet shield dan router yang dilengkapi dengan modem internet.

II. LANDASAN TEORI

A. Transformator Distribusi

Transformator distribusi mengkonversi daya dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah. Spesifikasi transformasi distribusi biasanya dinyatakan kapasitas daya yang dikonversi, level tegangan sisi primer dan tegangan sisi sekunder, hubungan belitan primer dan sekunder. Sementara

spesifikasi teknis dan spesifikasi lainnya, seperti persentase tegangan impedansi, rugi-rugi tanpa beban, rugi-rugi beban penuh, efisiensi dan pengaturan tegangan pada faktor daya tertentu dapat diperoleh dari katalog yang disediakan pabrik pembuat transformator distribusi.

Besar arus pada kondisi beban penuh yang mengalir pada sisi primer (sisi tegangan tinggi), I_1 dan sisi sekunder (sisi tegangan rendah), I_2 dihitung berdasarkan persamaan [2]:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{1,L-L}} \quad (1)$$

dan

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{2,L-L}} \quad (2)$$

dimana S adalah kapasitas transformator distribusi, $V_{1,L-L}$ adalah tegangan *line to line* sisi primer dan $V_{2,L-L}$ adalah tegangan *line to line* sisi sekunder. Bila hubungan belitan transformator distribusi adalah D/Y (delta/bye), maka perbandingan transformasi k , dapat dihitung dengan persamaan:

$$k = \frac{V_{2,L-L}/\sqrt{3}}{V_{1,L-L}} = \frac{V_{2,L-N}}{V_{1,L-N}} \quad (3)$$

dimana $V_{1,L-N}$ adalah tegangan primer *line to netral* atau tegangan fasa sisi primer dan $V_{2,L-N}$ adalah tegangan sekunder *line to netral* atau tegangan fasa sisi sekunder.

Drop tegangan impedansi per fasa dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_{drop} = \frac{Z}{100} \times V_{2,L-N} \quad (4)$$

dan impedansi ekivalen ditinjau dari sisi sekunder dihitung dengan:

$$Z_{02} = \frac{V_{drop}}{I_2} \quad (5)$$

dimana V_{drop} adalah drop tegangan akibat impedansi, Z adalah persentase tegangan impedansi dan Z_{02} adalah impedansi ekivalen per fasa ditinjau dari sisi sekunder.

Rugi-rugi tembaga pada beban penuh merupakan selisih antara rugi-rugi total pada beban penuh dan rugi-rugi pada kondisi tanpa beban, atau:

$$P_{loss,CU} = P_{loss,FL} - P_{loss,NL} \quad (6)$$

dimana,

$$P_{loss,CU} = 3I_2^2 R_{02} \quad (7)$$

dan

$$Z_{02} = \sqrt{R_{02}^2 + X_{02}^2} \quad (8)$$

dimana $P_{loss,CU}$ adalah rugi-rugi tembaga total, $P_{loss,NL}$ adalah rugi-rugi total pada kondisi tanpa beban, $P_{loss,FL}$ adalah rugi-rugi total pada kondisi beban penuh, I_2 adalah arus sisi sekunder pada beban penuh, R_{02} dan X_{02} masing-masing adalah resistansi dan reaktansi ekivalen per fasa ditinjau dari sisi sekunder.

B. Ketidakseimbangan Beban dan Tegangan

Beban yang terhubung pada setiap fasa di transformator distribusi biasanya tidak sama setiap saat, sehingga mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak sama pada setiap fasa. Indikator ketidakseimbangan beban, U_I , adalah menggunakan persentase ketidakseimbangan arus yang dinyatakan dengan [3]:

$$U_I = \frac{\text{Deviasi arus fasa}}{\text{Nilai rata - rata arus fasa}} \times 100\% \quad (9)$$

atau bila dinyatakan dalam bentuk arus fasa, maka dapat ditulis sebagai:

$$U_I = \frac{|I_R - I_{avg}| + |I_S - I_{avg}| + |I_T - I_{avg}|}{I_{avg}} \times 100\% \quad (10)$$

dimana I_R, I_S, I_T masing-masing adalah nilai rms dari arus fasa R, fasa S dan fasa T, dan I_{avg} adalah nilai arus rata-rata yang besarnya:

$$I_{avg} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (11)$$

Persamaan 11 juga dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$U_I = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100\% \quad (12)$$

dimana,

$$a = \frac{I_R}{I_{avg}} \quad (13)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{avg}} \quad (14)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{avg}} \quad (15)$$

dimana a , b dan c masing-masing adalah faktor ketidakseimbangan arus atau beban dari fasa R, fasa S dan fasa T.

Dengan menggunakan cara yang sama dengan perhitungan indikator ketidakseimbangan beban atau arus, maka indikator ketidakseimbangan tegangan, U_V , dihitung sebagai [4]-[6]:

$$U_V = \frac{\text{Deviasi tegangan fasa}}{\text{Nilai rata - rata tegangan fasa}} \times 100\% \quad (16)$$

atau bila dinyatakan dalam tegangan fasa ke netral, maka:

$$U_V = \frac{|V_R - V_{avg}| + |V_S - V_{avg}| + |V_T - V_{avg}|}{V_{avg}} \times 100\% \quad (17)$$

dimana V_R, V_S, V_T masing-masing adalah tegangan fasa ke netral dari fasa R, fasa S dan fasa T dan V_{avg} adalah tegangan rata-rata yang besarnya dihitung dengan persamaan:

$$V_{avg} = \frac{V_R + V_S + V_T}{3} \quad (18)$$

Persamaan 17 juga dapat ditulis dalam bentuk:

$$U_V = \frac{|d-1| + |e-1| + |f-1|}{3} \times 100\% \quad (19)$$

dimana,

$$d = \frac{V_R}{V_{avg}} \quad (20)$$

$$e = \frac{V_S}{V_{avg}} \quad (21)$$

$$f = \frac{V_T}{V_{avg}} \quad (22)$$

Koefisien-koefisien d , e , dan f masing-masing menyatakan faktor ketidakseimbangan tegangan fasa R, fasa S dan fasa T. Dengan menggunakan faktor ketidakseimbangan arus, maka besar arus netral akibat ketidakseimbangan beban, I_N yang mengalir pada konduktor netral besarnya adalah [7]:

$$I_N = I_{avg} \times \left(a - \frac{(b+c)}{2} + j \frac{(c-b)}{2} \sqrt{3} \right) \quad (23)$$

Pada kondisi tidak seimbang rugi-rugi tembaga total akan menjadi:

$$P_{loss,Cu} = I_R^2 R_{02} + I_S^2 R_{02} + I_T^2 R_{02} \quad (24)$$

sehingga rugi-rugi total dari transformator distribusi menjadi:

$$P_{loss,tot} = P_{loss,NL} + P_{loss,Cu} \quad (25)$$

atau,

$$P_{loss,tot} = P_{loss,NL} + I_R^2 R_{02} + I_S^2 R_{02} + I_T^2 R_{02} \quad (26)$$

C. Internet of Things

Perkembangan teknologi internet telah membawa perubahan pada perkembangan teknologi lain, termasuk dalam teknologi akuisisi data. Penerapan teknologi internet dalam akuisisi data melahirkan teknologi internet of things (IoT) [8]. IoT adalah sistem fisik atau jaringan yang terdiri dari banyak objek atau things dan sensor atau aktuator yang saling terhubung dalam jaringan internet dan digunakan sebagai sarana untuk mengalirkan data yang dihasilkan oleh sensor/things. Melalui IoT data dapat dikumpulkan, dipertukarkan, dan dianalisis untuk mendapatkan informasi yang bernilai terkait dalam hubungan antar sensor tersebut. Teknologi IoT memungkinkan monitoring, pengendalian, dan otomatisasi proses suatu objek dari jarak jauh di seluruh infrastruktur jaringan yang ada.

Beberapa penelitian telah diusulkan untuk kebutuhan monitoring penampiran transformator distribusi dengan menggunakan teknologi IoT [9]-[11].

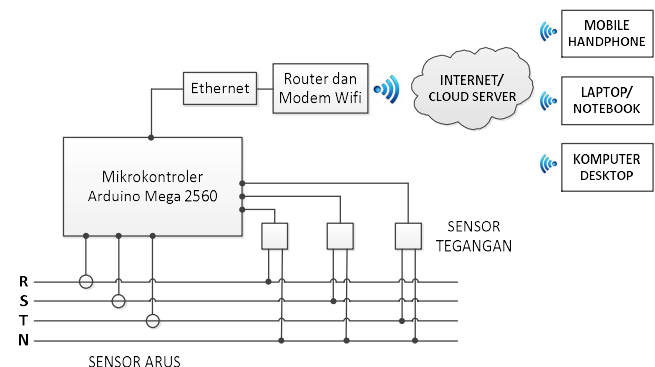
III. METODE PENELITIAN

Metode-metode yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

A. Perancangan dan Pembuatan Alat

Alat monitoring ketidakseimbangan beban dirancang dan dibuat seperti diagram yang ditunjukkan pada gambar 1. Data tegangan dan arus yang diukur oleh sensor tegangan ZMPT101B dan sensor arus SCT019 adalah data tegangan dan arus rms. Data-data hasil pengukuran ini kemudian diproses di dalam mikrokontroler Arduino Mega 2560 untuk menghitung indikator ketidakseimbangan beban dan ketidakseimbangan tegangan, nilai arus netral,

pemakaian daya di setiap fasa, rugi-rugi pada kondisi seimbang dan tidak seimbang. Data-data hasil pengukuran dan perhitungan kemudian dikirim ke *webserver* di jaringan internet menggunakan ethernet shield W5100 dan router wifi TP-Link 3200 yang dilengkapi dengan modem internet. Semua data tersebut dapat diakses secara langsung melalui laptop dan komputer yang terhubung ke jaringan internet atau melalui *handphone*.



Gambar 1. Diagram Perancangan Alat Monitoring

Program pengukuran arus dan tegangan rms menggunakan perangkat lunak EmonLib [12]. Program lain yang dibuat adalah program perhitungan indikator ketidakseimbangan beban dan ketidakseimbangan tegangan, perhitungan arus netral, pemakaian daya setiap fasa dan program mengirimkan data hasil perhitungan dan pengukuran ke *webserver*. Semua program komputer yang dibuat menggunakan bahasa pemrograman C dan diupload ke mikrokontroler menggunakan perangkat lunak Arduino IDE.

B. Pembuatan Webserver

Webserver digunakan untuk menampung data yang dikirim, menyimpan dan menampilkan data di internet. *Webserver* dibuat dengan menggunakan layanan *web hosting* 000webhost.com. Bahasa pemrograman PHP, Javascript dan HTML digunakan untuk pemrograman pada *webserver*. Tampilan grafik dibuat dengan menggunakan *script* dari Canvasjs.com.

C. Pengujian

Pengujian alat monitoring ketidakseimbangan beban ini dilakukan pada sisi sekunder transformator

distribusi, yakni pada panel hubung bagi transformator (PHBT). Adapun spesifikasi transformator distribusi yang diuji ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi dan Karakteristik Transformator Distribusi

A	Karakteristik Umum		
1	Pembuat	SINTRA	
2	Tipe Transformator	Tipe minyak yang tertutup rapat (<i>Hermetically sealed totally oil filled</i>)	
3	Jumlah Fasa	3	
4	Frekuensi	50 Hz	
B	Spesifikasi Teknis		
1	Kapasitas	160 kVA	
2	Tegangan Primer	20 kV	
3	Tegangan Sekunder	0,4 kV	
4	Grup vektor	DYn5	
5	Sistem Pendingin	ONAN	
6	Kenaikan Temperatur		
	Minyak	50 ⁰	
	Belitan	55 ⁰	
7	Rugi-rugi tanpa beban	400 Watt	
8	Rugi-rugi pada beban penuh	2000 Watt	
9	Tegangan impedansi	4%	
10	Arus eksitasi (tanpa beban)	2,2%	
C	Efisiensi dan Pengaturan Tegangan		
	Faktor Daya	Efisiensi (%)	Pengaturan Tegangan (%)
	0,8	98,16	3,31
	1.0	98.52	1.32

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bentuk fisik alat monitoring ketidakseimbangan beban hasil perancangan ditunjukkan pada gambar 2.



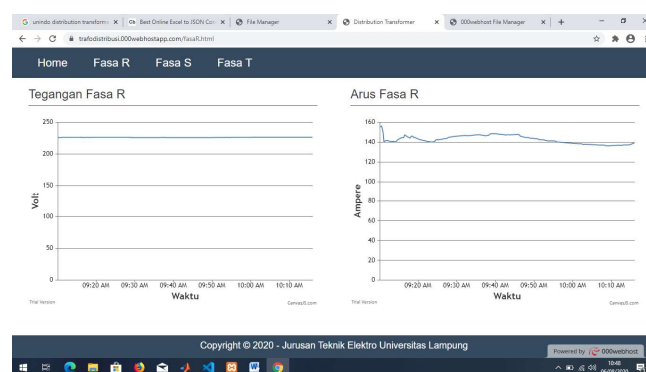
Gambar 2. Alat Monitoring Ketidakseimbangan Beban

Pengujian monitoring ketidakseimbangan beban dilakukan pada panel hubung bagi transformator (PHBT) di sisi sekunder transformator distribusi. Rangkaian pengujian ditunjukkan pada gambar 3. Setiap fasa mempunyai dua rel penghantar, sehingga jumlah sensor arus yang dibutuhkan adalah enam, satu sensor untuk setiap rel penghantar.

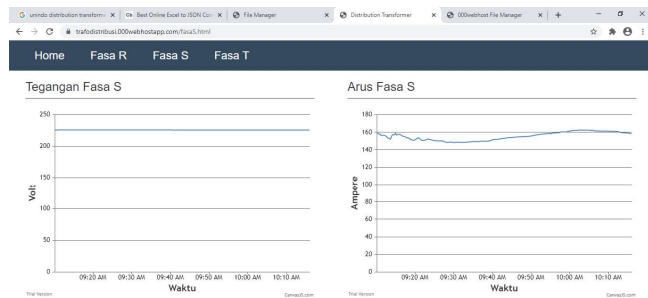


Gambar 3. Rangkaian Pengujian Di Lapangan

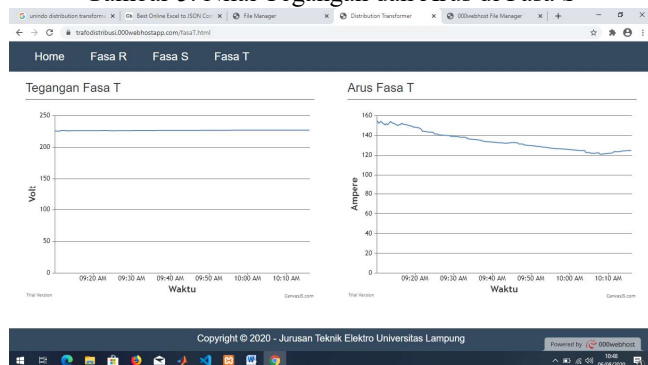
Pengujian dilakukan selama lebih dari 1 jam, yakni antara pukul 09.10 WIB sampai dengan pukul 10.15 WIB. Hasil pengujian pengukuran nilai tegangan dan arus pada fasa R, fasa S dan fasa T masing-masing ditunjukkan pada gambar 4, gambar 5 dan gambar 6.



Gambar 4. Nilai Tegangan dan Arus di Fasa R

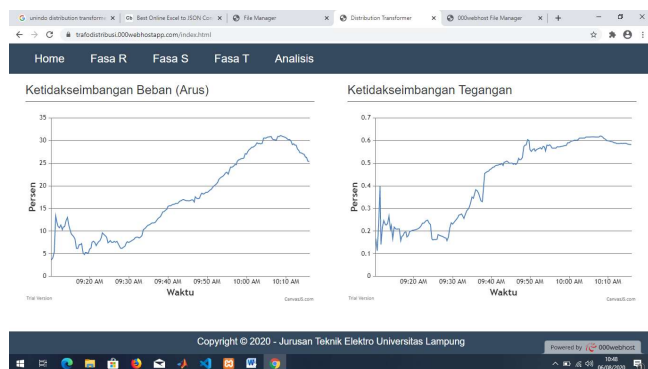


Gambar 5. Nilai Tegangan dan Arus di Fasa S



Gambar 6. Nilai Tegangan dan Arus di Fasa T

Hasil perhitungan indikator ketidakseimbangan beban (arus) dan ketidakseimbangan tegangan ditunjukkan pada gambar 7.

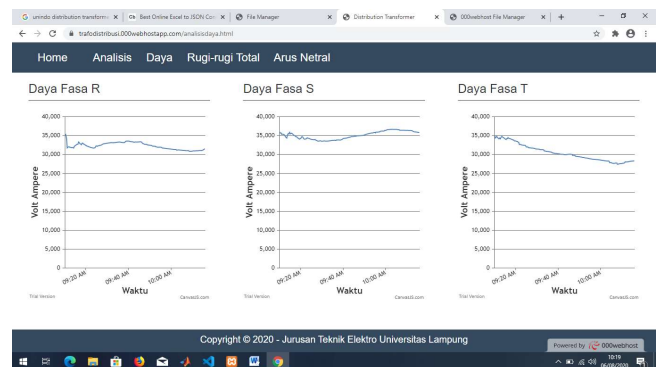


Gambar 7. Indikator Ketidakseimbangan Beban dan Tegangan

Data pengukuran dan perhitungan yang ditampilkan setiap 20 detik pada laman *web server*. Gambar 7 menunjukkan indikator ketidakseimbangan beban tertinggi yang diperoleh selama pengujian adalah sebesar 31,113%, sementara indikator ketidakseimbangan tegangan yang tertinggi adalah

sebesar 0,62%. Batas ketidakseimbangan tegangan standar yang diizinkan oleh penyedia listrik dengan indikator menggunakan deviasi tegangan fasa adalah maksimum 2% [13]. Dengan melihat hasil pengujian, kenaikan linier indikator ketidakseimbangan beban hingga 100% akan menyebabkan kenaikan indikator ketidakseimbangan tegangan mendekati 2%. Oleh karena itu, indikator ketidakseimbangan beban menggunakan arus fasa sesuai untuk digunakan untuk keperluan monitoring ketidakseimbangan beban transformator distribusi.

Hasil perhitungan pemakaian daya pada setiap fasa ditunjukkan pada gambar 8. Pemakaian daya yang tidak sama pada setiap fasa menunjukkan bahwa selama pengujian kondisi beban tidak seimbang.



Gambar 8. Pemakaian Daya Setiap Fasa

Sementara perhitungan rugi-rugi total pada kondisi tidak seimbang dan pada kondisi seimbang ditunjukkan pada gambar 9. Perhitungan untuk kondisi seimbang dihitung dengan memisalkan arus pada setiap fasa sama besarnya, yakni sebesar nilai arus rata-ratanya.

Rugi-rugi total pada keadaan seimbang dinyatakan dengan rumus:

$$P_{loss,tot} = P_{loss,NL} + 3I_{avg}^2 R_{02} \quad (27)$$

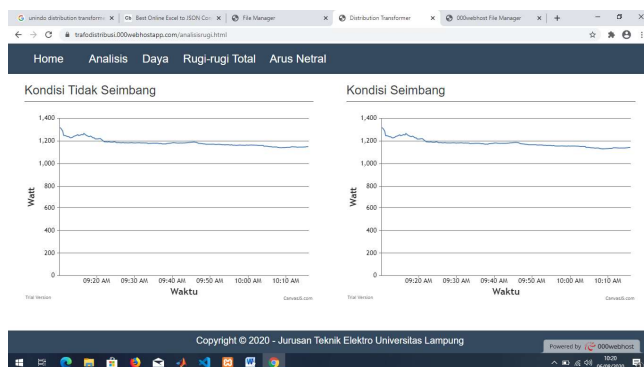
Nilai resistansi per fasa transformator distribusi ditinjau dari sisi sekunder, R_{02} , dianggap konstan selama pengujian. Nilainya dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan 6 dan persamaan 7 serta data-data spesifikasi transformator distribusi. Rugi-rugi tembaga total pada kondisi beban penuh adalah:

$$P_{loss,Cu} = P_{loss,FL} - P_{loss,NL} = 2000 - 400 = 1600 \text{ Watt}$$

Sehingga,

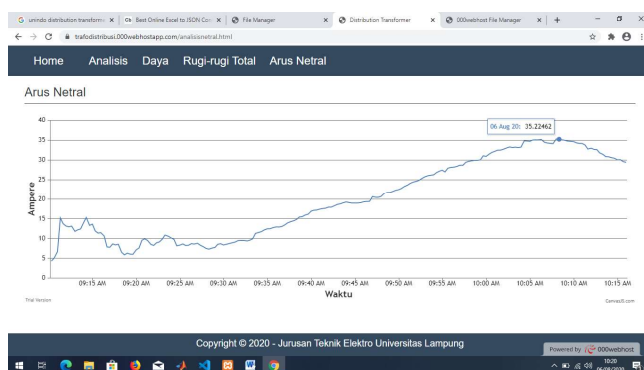
$$R_{02} = \frac{P_{loss,Cu}}{3 \times I_2^2} = \frac{1600}{3 \times 230,94^2} = 0,01 \text{ ohm/fasa}$$

Gambar 9 menunjukkan bahwa rugi-rugi total yang dihasilkan pada kondisi tidak seimbang lebih besar dibandingkan rugi-rugi total pada kondisi seimbang.



Gambar 9. Rugi-rugi Total Pada Kondisi Tidak Seimbang dan Kondisi Seimbang

Hasil perhitungan arus netral berdasarkan persamaan 23 ditunjukkan pada gambar 10.



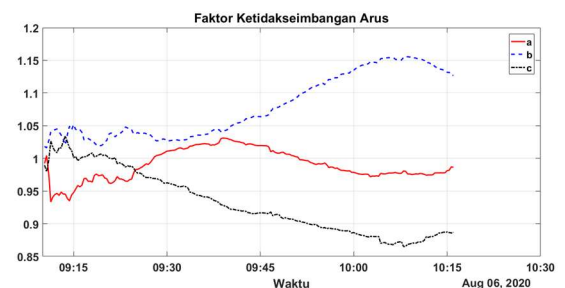
Gambar 10. Arus Netral

Dari gambar 10 dapat dilihat arus netral yang mengalir pada konduktor netral selama pengujian mempunyai trend grafik yang hampir sama dengan grafik ketidakseimbangan arus pada gambar 7. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar ketidakseimbangan beban, maka semakin besar pula arus yang mengalir pada konduktor netral.

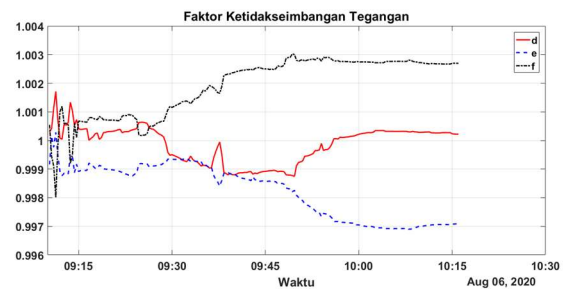
Faktor ketidakseimbangan arus setiap fasa dan faktor ketidakseimbangan tegangan setiap fasa tidak

diplot secara online pada laman *webserver*. Dari data yang diperoleh selama pengujian, maka besar faktor ketidakseimbangan arus dan ketidakseimbangan tegangan setiap fasa masing-masing ditunjukkan pada gambar 11 dan gambar 12.

Dari gambar 11 dan gambar 12 dapat dilihat bahwa semakin besar faktor ketidakseimbangan beban atau arus, maka semakin kecil faktor ketidakseimbangan tegangan dan demikian juga sebaliknya. Pada rentang pengujian antara pukul 09.30 dan pukul 10.00, baik faktor ketidakseimbangan beban maupun faktor ketidakseimbangan arus pada fasa S dan fasa T nilainya semakin menjauhi nilai 1, sehingga pada rentang waktu ini nilai indikator ketidakseimbangan beban (arus) dan indikator ketidakseimbangan tegangan semakin besar.



Gambar 11. Faktor Ketidakseimbangan Arus



Gambar 12. Faktor Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi menyebabkan kenaikan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi total transformator distribusi. Rugi-rugi tembaga dihasilkan dalam bentuk panas dan bila nilainya semakin besar akan menaikkan temperatur belitan dan isolasi [14]. Bila indikator ketidakseimbangan beban semakin besar, maka temperatur belitan dan isolasi transformator juga akan semakin besar pula.

V. KESIMPULAN

Peralatan monitoring ketidakseimbangan beban transformator distribusi berbasis teknologi internet of things dapat bekerja dengan baik untuk memonitor penampilan transformator distribusi dalam kondisi beban tidak seimbang. Hasil pengukuran tegangan dan arus setiap fasa serta hasil perhitungan indikator ketidakseimbangan beban, ketidakseimbangan tegangan, rugi-rugi dan arus netral dapat ditampilkan secara online.

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Lampung yang telah memberikan dana untuk terlaksananya penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Salustiano, R., Neto, E., and Martinez, M. (2013). *The Unbalanced Load Cost on Transformer Losses at A Distribution System*, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, pp.1-3.
- [2] Theraja, B.L., and Theraja, A.K. (2005). *A Textbook of Electrical Technology, Volume II: AC and DC Machines*. S. Chand and Co.Ltd, New Delhi.
- [3] Zebua, O., Setiawan, A.H., Soedjarwanto, N., Anggara, J. dan Haris, A. (2016). *Rancang Bangun Alat Monitoring Ketidakseimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Menengah*. Jurnal Nasional Teknik Elektro, Vol.5, No.3, November 2016, halaman 405-413.
- [4] von Jouanne, A., and Banerjee, B.. (2001). *Assessment of Voltage Unbalance*. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 16, no.4, pp.782-790.
- [5] Pillay, P., and Manyage M. (2001). *Defenition of Voltage Unbalance*. IEEE Power Engineering Review, vol.21, no.5, pp.49-51.
- [6] Seiphetlho, T.E., and Rens, A.P.J. (2010). *On the Assesment of Voltage Unbalance*. Proceedings of 14th International Conference on Harmonic and Quality of Power (ICHQP), pp.1-6.
- [7] Rao, N.M., Narayanan, R., Vausdevamurthy, B.R., Das, S.K., (2013). *Performance Requirements of Present-Day Distribution Transformer*, IEEE ISGT Asia 2013, pp.1-6.
- [8] Wang, C., Daneshmand, M., Dohler, M., Mao, X., Hu, R.Q., and Wang, H. (2013). *Guest Editorial – Special Issues on Internet of Things (IoT): Architecture, Protocols and Services*. IEEE Sensors Journal, vol.13, no.10, pp.3505-3508.
- [9] Yaman, O., and Bicen, Y. (2019). *An Internet of Things (IoT) Based Monitoring System for Oil-immersed Transformer*. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, vol.7, no.3, pp.226-234.
- [10] Pawar, R.R. and Deosarkar, S.B. (2017). *Health Condition Monitoring System For Distribution Transformer Using Internet of Things*. Proceedings of the IEEE 2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication, pp.117-122.
- [11] Vaz, F.A.J. (2018). *IoT Based Distribution Transformer Care System*. Proceedings of 4th International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), pp.1-6.
- [12] *Open Eney Monitor Software*. (2013). [Online]. Available: <https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>.
- [13] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. (2009). IEEE Std. 1159TM-2009. IEEE Power Engineering and Society.
- [14] Yang, C., Cheng, X., Chen, F., and Qiao, L. (2018). *Research on Influence of Three-phase Current Unbalance on Transformer Losses and the Top-Oil Temperature*. Proceedings of IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), pp.1145-1149.