

Jurnal Adi Buana_Fajar Sukarno Aji Pandawa

by cek turnitin

Submission date: 07-Jul-2023 05:33AM (UTC-0500)

Submission ID: 2127658844

File name: Jurnal_Adi_Buana_Fajar_Sukarno_Aji_Pandawa_1.pdf (665.36K)

Word count: 4933

Character count: 29507



Surabaya, 6 Juli 2023

28

SEMINAR NASIONAL HASIL RISET DAN PENGABDIAN



Universitas Surabaya

"Peran Riset, Inovasi dan Pengabdian Kepada Masyarakat Bagi Pembangunan Indonesia Berkelanjutan"

Studi Kasus Pengaturan Proteksi Rele Diferensial Transformator 1 Gardu Induk 150 kV Tanggul

Fajar Sukarno Aji Pandawa, Hadi Tasmono, Reza Sarwo Widagdo*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

*Email: rezaswidagdo@untag-sby.ac.id

Abstrak

Rele diferensial pada transformator merupakan proteksi penting yang bekerja secara independen dan membutuhkan waktu respon cepat. Pengaturan yang tepat pada rele merupakan faktor kunci dalam menjaga keefektifan proteksi sistem transmisi dan meningkatkan efisiensi. Penelitian ini memanfaatkan data sekunder yang didapat dari gardu induk Tanggul digunakan sebagai dasar perhitungan matematis. Rasio transformator arus yang digunakan pada transformator memiliki konfigurasi 300:1 A pada sisi primer 150 kV, dan 2000:5 A pada sisi sekunder 20 kV. Penentuan rasio ini dilakukan berdasarkan perhitungan yang dilakukan, diperoleh nilai arus rating sebesar 254,034 A pada sisi primer 150 kV dan 1905,256 A pada sisi sekunder 20 kV. Iset yang didapatkan dari hasil perhitungan yaitu 0,0965 p.u. Namun, agar memenuhi persyaratan keselamatan yang meliputi faktor keamanan (5%), mismatch (4%), arus eksitasi (1%), kesalahan sadapan (10%), dan kesalahan CT (10%), Iset disesuaikan menjadi 0,3 p.u. dengan harapan bahwa pengaturan tersebut dapat berfungsi secara optimal. Berdasarkan perhitungan, diperoleh slope 1 dan slope 2 sebesar 11,8% dan 23,6%. Kurva karakteristik mengalami pergeseran, sehingga responsivitas rele akan meningkat dan memiliki toleransi yang rendah terhadap arus diferensial transien. Dalam simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP Power Station 19.0.1, kinerja rele diferensial pada transformator 1 gardu induk Tanggul sudah benar dan menunjukkan hasil yang sesuai dengan prinsip selektivitas dalam daerah proteksi.

Kata Kunci: Proteksi, Gangguan Arus Lebih, Rele Diferensial, ETAP.

PENDAHULUAN

Transformator adalah komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang meliputi komponen pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik. Transformator daya digunakan untuk mengatur tegangan dalam proses transmisi energi, mengurangi kerugian yang terjadi. Namun, transformator rentan terhadap gangguan yang dapat mengganggu kinerjanya bahkan menyebabkan kecelakaan (A. Prasetyo dkk., 2022). Oleh karena itu, penting untuk memiliki sistem proteksi yang aman dan handal dalam menjaga operasi yang lancar. Data statistik dalam *Electric Power Systems* (EPS) menunjukkan bahwa sekitar 25% kecelakaan serius dapat dikaitkan dengan kesalahan pada rele proteksi dan sistem otomatisasi pada EPS (Andreev dkk., 2017). Salah satu elemen yang memegang peranan krusial dalam sistem tenaga listrik adalah

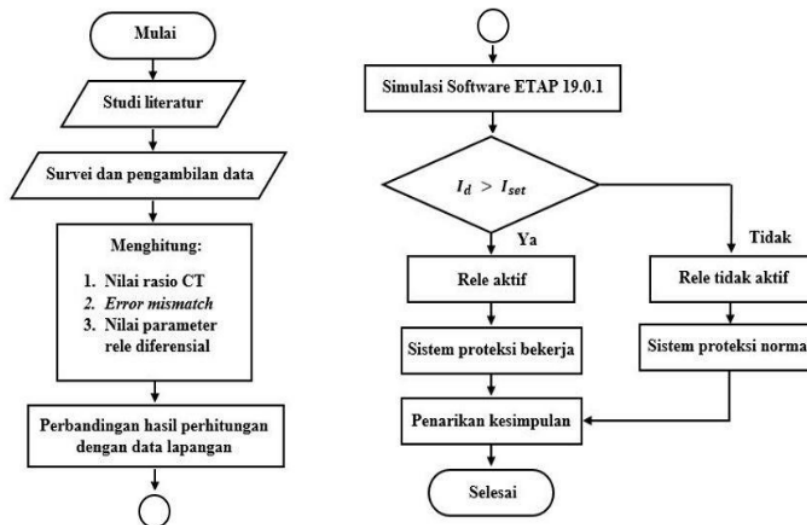
perlindungan peralatan terhadap berbagai jenis gangguan. Meskipun tidak mungkin menghindari gangguan secara total, namun sistem tenaga listrik harus memiliki perlindungan yang efektif untuk mencegah kerusakan pada peralatan. Gangguan yang terjadi dalam sistem kelistrikan bahkan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan. Sistem proteksi tidak hanya bertugas untuk melindungi peralatan listrik dari gangguan, tetapi juga berperan dalam mengisolasi dan membatasi dampak gangguan tersebut. Oleh karena itu, penggunaan sistem pengamanan yang efisien sangatlah penting dalam sistem tenaga listrik (Aita Diantari & Mardhi Rahmatullah, 2017). Proteksi diferensial pada transformator merupakan perlindungan yang penting dan memiliki waktu respon yang cepat (Ahmed, 2016). Rele diferensial berfungsi sebagai perlindungan utama pada transformator, bekerja secara independen tanpa perlu dikomunikasikan dengan proteksi lainnya (Jeckson dkk., 2021). Prinsip kerjanya didasarkan pada keseimbangan arus masuk dan keluar dari rele, sama seperti dengan Hukum Kirchoff 1 (Putra & Bahcrah, 2021).

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menentukan pengaturan setting rele diferensial yang optimal sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Sumber acuan utama yang menjadi referensi adalah penelitian (Sahnur Nasution dkk., 2019), yang memiliki data yang sama seperti penelitian ini yaitu terdapat perbandingan arus CT sebesar 300:1 A, sedangkan pada sisi sekunder sebesar 2000:5 A, dalam pengerjaannya terdapat sedikit perbedaan pada perhitungan matematisnya sehingga mendapatkan hasil arus *setting* yang sedikit berbeda dan dijadikan menjadi 0.3 pU karena mempertimbangkan aspek keamanan. Berbeda dengan penelitian lainnya pada penelitian (Aziz, 2022), cara menentukan arus setting dengan menambahkan hasil perhitungan Iset sebesar 0.018 A dengan standar yang sudah ditetapkan oleh PLN sebesar 0,3 A dikarenakan nilai arus *setting* yang didapat dalam perhitungan terlalu kecil sehingga menjadi 0,318 A. Selain itu dalam penelitian (Prasetyo, N., 2022), dilakukan juga penelitian rele diferensial dibarengi dengan simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa serta simulasi beban puncak pada transformator daya dengan memanfaatkan kurva karakteristik yang diimplementasikan dalam perangkat lunak *Microsoft Excel*. Pada penelitian (Hendratmoko & Supardi, 2021) memiliki data rasio CT sisi primer 300:5 A dan CT sisi sekunder 2000:5 yang dihitung secara matematis dan disimulasikan kinerjanya terhadap gangguan internal maupun eksternal memakai software ETAP versi 12.6.0. Dan dari perhitungan tersebut diperoleh nilai Iset 0,48 A. Penelitian (Utomo & Ilham, 2021) juga menggunakan software ETAP versi 12.6.1 dalam mensimulasikan kinerja rele diferensial dan merubah hasil perhitungan Iset yang awalnya 0,097 A ditambahkan dengan 0,3 A sesuai standar pengaturan PLN menjadi 0,397 A. Karena idealnya arus diferensial mendekati 0 sedangkan Iset tidak mungkin 0. Pada penelitian (Firmansyah dkk., 2022) melakukan penelitian terkait sistem proteksi tetapi hanya membahas proteksi *overcurrent relay* sebagai perlindungan backup untuk transformator daya dengan menggunakan perangkat lunak versi terbaru ETAP yaitu versi 19.0.1.

Penelitian ini membahas tentang penggunaan rele diferensial sebagai metode proteksi utama pada transformator daya guna mencegah kegagalan proteksi yang dapat membahayakan sistem. Studi kasus yang dijadikan fokus penelitian ini dilakukan pada unit layanan dan transmisi di Gardu Induk Tanggul, Jember. Metode yang diterapkan adalah analisis dan pengolahan data yang dilakukan secara cermat. Dengan melakukan perhitungan matematis terhadap pengaturan setting rele diferensial dan membandingkannya dengan hasil pengujian lapangan, peneliti dapat mengevaluasi kinerja rele diferensial yang telah terpasang dalam kondisi nyata. Selain itu, penulis juga melakukan perbandingan karakteristik hasil uji lapangan dengan hasil perhitungan slope, serta memakai perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk melakukan simulasi terhadap kinerja rele diferensial saat terjadi gangguan, baik di dalam maupun di luar zona proteksi. Dengan pendekatan ini, penelitian ini memiliki tujuan untuk memperoleh pemahaman mengenai efektivitas dan keandalan penggunaan rele diferensial dalam sistem proteksi transformator daya.

METODE

Dalam studi ini, penulis mengadopsi metode analisis dan pengolahan data sebagai pendekatan utama. Pendekatan ini memiliki kecenderungan untuk menghasilkan data yang lebih obyektif karena sifatnya yang kuantitatif dan dapat diukur secara matematis. Survei dan pengambilan data di Gardu Induk Tanggul, Jember pada bulan Februari 2023. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil pengukuran dan pengujian yang dilakukan oleh tim proteksi PT. PLN (Persero) ULTG Jember di Gardu Induk Tanggul dengan perhitungan secara matematis yang dilakukan oleh peneliti. Penelitian ini nantinya bisa sebagai rekomendasi atau pembandingan dalam menentukan pengaturan pada rele diferensial.



Gambar 1. Diagram Alir

Gambar 1. menunjukkan proses penelitian dimulai dengan pengumpulan data yang meliputi kapasitas transformator, rasio CT, dan data pengujian *setting* rele diferensial. Langkah berikutnya adalah melakukan perhitungan manual untuk mendapatkan *setting* rele diferensial. Perhitungan ini mencakup nilai rasio transformator arus, *error mismatch*, arus sekunder (I_s), arus diferensial (I_d), arus penahan (I_r), persentase *slope* (kecuraman), dan nilai arus *setting* (I_{set}). Setelah memperoleh nilai perhitungan, fokus selanjutnya adalah pada arus diferensial. Jika arus diferensial kurang dari nilai *setting* yang ditentukan, rele seharusnya tidak beroperasi dan sistem proteksi berada dalam kondisi normal. Namun, jika I_d melebihi nilai *setting*, sistem proteksi akan beroperasi dan rele diferensial akan melakukan trip. Tahap terakhir melibatkan pengujian kinerja rele diferensial melalui simulasi memakai software ETAP versi 19.0.1. Simulasi ini akan menciptakan gangguan dan menghasilkan data yang dapat dianalisis untuk mengevaluasi kinerja rele diferensial, termasuk waktu operasi, keakuratan deteksi, dan selektivitas.

PENGAMBILAN DATA

Pada penelitian ini, digunakan data-data yang didapatkan dari Gardu Induk Tanggul, Jember. Data ini sangat penting dalam proses pengerjaan antara lain data spesifikasi tentang transformator 1 yang terdapat di Gardu Induk Tanggul. Transformator ini dibuat oleh PT. XD Sakti Indonesia pada tahun 2019 dan transformator ini mempunyai kapasitas daya sebesar 60 MVA dengan tegangan pada sisi primer 150 kV dan sisi sekunder 20 kV seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Transformator

Spesifikasi Transformator I	
Merek	XD Sakti Indonesia
Type	SFZ-600000/150
No seri	2C13SK023
Tahun pembuatan	2019
Frekuensi	50 Hz
Fasa	3
Kapasitas	60 MVA
Tegangan	HV: 150 kV LV: 20 kV
Impedansi	12,54 %
Cooling	ONAN/ONAF (60%/100%)

Dibutuhkan data transformator arus yang berisi besaran rasio yang digunakan untuk mencari arus sekunder CT untuk dilakukan perhitungan arus *setting*. Pada transformator I memiliki rasio sebesar 300/ 1 A pada sisi tegangan 150 kV sedangkan 2000/5 A pada sisi tegangan 20 kV seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Current Transformer

Data Current Transformer		
CT	HV Side	LV Side
Rasio	300/ 1	2000/ 5

Selain itu, dibutuhkan spesifikasi rele diferensial untuk memudahkan perhitungan dalam menentukan arus *setting*, rele diferensial dipasang pada transformator 1 di Gardu Induk Tanggul adalah Alstom tipe P643. Rele diferensial tersebut memiliki nilai arus nominal seperti Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Rele Diferensial

Spesifikasi Rele Diferensial	
Merek	ALSTOM
Type	P643
No seri	34471520/06/18
Arus nominal	1 Ampere

Serta diperlukan data pengujian rele diferensial pada transformator 1 di Gardu Induk Tanggul guna untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan secara matematis nantinya yaitu arus *setting* (I_{set}), arus penahan (I_r), persentase *slope* (kecuraman) seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Pengujian Rele Diferensial

Data Nilai Setting Rele Diferensial	
I_{set}	0,3 pU
I_r	$(I_1 + I_2)/2$
$Slope_1$	30 %
$Slope_2$	80 %

PERHITUNGAN MATEMATIS

Dalam menetapkan pengaturan rele diferensial, diperlukan serangkaian perhitungan yang meliputi nilai rasio CT, *error mismatch*, perolehan arus sekunder, perhitungan arus diferensial, arus penahan (*restrain*), penetapan persentase kecuraman, penentuan nilai pengaturan arus diferensial, serta perhitungan saat terjadi gangguan pada rele diferensial.

1. Rasio CT

Perhitungan ini memiliki tujuan utama untuk mendapatkan rasio yang optimal dengan memilih rasio yang paling mendekati arus rating yang diinginkan (Keumala dkk., 2021). Selain itu, perhitungan ini juga dipakai untuk mengevaluasi tingkat kesalahan mismatch. Sebelum menentukan rasio CT, perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai arus nominal dan arus rating. Arus rating (I_{rat}) memiliki peran penting sebagai batasan dalam menentukan rasio CT yang tepat untuk diterapkan. Arus nominal (I_n) adalah nilai arus yang

mengalir dalam masing-masing jaringan listrik, baik pada tegangan tinggi maupun tegangan rendah. Perhitungan arus nominal di sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus:

$$I_{n1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_p} \quad (1)$$

$$I_{n2} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_s} \quad (2)$$

Dalam perhitungan arus rating pada sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus:

$$I_{rat1} = 110\% \times I_n \quad (3)$$

Dimana I_n adalah arus nominal (A), S adalah kapasitas transformator (VA), V_p adalah tegangan primer (V), V_s adalah tegangan sekunder (V), I_{rat} adalah arus rating (A).

2. Error Mismatch

Tujuannya adalah untuk melakukan perbandingan antara rasio ideal dari transformator arus (CT) dengan rasio yang tersedia di pasar, dengan persyaratan bahwa tingkat kesalahan (*error*) Tidak diperbolehkan melebihi 5% dari nilai rasio CT yang telah ditentukan (Subari & Hapsari Kusumastuti, 2015). Perhitungan rasio CT dan *error mismatch* di sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus:

$$\text{Rasio } CT_1 \text{ (ideal)} = \text{rasio } CT_2 \times \frac{V_s}{V_p} \quad (4)$$

$$\text{Rasio } CT_2 \text{ (ideal)} = \text{rasio } CT_1 \times \frac{V_p}{V_s} \quad (5)$$

Rumus yang digunakan untuk menentukan besarnya *error mismatch* adalah sebagai berikut:

$$\text{Error Mismatch} = \frac{\text{CT Ideal}}{\text{CT Terpasang}} \% \quad (6)$$

Dimana *rasio CT₁ ideal* adalah rasio CT ideal sisi primer (A), *rasio CT₂ ideal* adalah rasio CT ideal sisi sekunder (A), *rasio CT₁* adalah rasio CT primer yang terpasang (A), *rasio CT₂* adalah rasio CT sekunder yang terpasang (A), V_p adalah tegangan primer (V), dan V_s adalah tegangan sekunder (V). (*Error Mismatch*) adalah kesalahan pembacaan arus (%).

3. Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT adalah hasil keluaran dari transformator daya yang terdeteksi oleh CT dan digunakan sebagai masukan ke rele. Dengan menggunakan perhitungan ini, rele diferensial dapat mendeteksi adanya perbedaan arus antara sisi sekunder CT yang menunjukkan kemungkinan adanya gangguan atau kegagalan dalam sistem.

$$I_{\text{sekunder}} = \frac{1}{\text{rasio CT}} \times I_n \quad (7)$$

Dimana I_{sekunder} adalah arus keluaran transformator arus (A), *rasio CT* adalah rasio CT yang terpasang (A), I_n adalah arus nominal (A).

4. Arus Diferensial

Untuk menghitung arus diferensial (I_d), digunakan persamaan yang memperhitungkan selisih antara arus sekunder pada sisi primer dan sekunder. Dalam kasus penggunaan rele diferensial bias yang beroperasi berdasarkan persentase arus, nilai I_1 (arus sekunder 20 kV) dan I_2 (arus sekunder 150 kV) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$I_d = |I_2 - I_1| \quad (8)$$

Rele diferensial yang diterapkan dalam sistem beroperasi berdasarkan persentase dari arus (Fauzi dkk., 2020), sehingga untuk mendapatkan nilai I_1 dan I_2 menjadi pu maka arus tersebut dibagi dengan I_{base} . Dimana I_{base} dalam penelitian ini adalah arus nominal pada masing masing CT. Untuk mencari nilai arus diferensial yang terbaca oleh rele, dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_d = \left| \frac{I_2'}{I_{\text{base}}} - \frac{I_1'}{I_{\text{base}}} \right| \quad (9)$$

Dimana I_d adalah arus diferensial (pu), I_1 adalah arus sekunder 150kV (pu), I_2 adalah arus sekunder 20kV (pu), I_1' adalah arus beban CT 150kV (A), I_2' adalah arus beban CT 20kV (A), dan I_{base} adalah arus dasar (pu).

5. Arus Restrain

Perhitungan arus restrain/ arus penahan dilakukan untuk menentukan arus penahan yang mencegah rele aktif pada kondisi normal. Perhitungan arus restrain tersebut kemudian digunakan untuk menghitung persentase kecuraman dan arus *setting* pada rele diferensial.

$$I_r = \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right| \quad (10)$$

Dimana I_r adalah arus *restrain* (pU), I_2 adalah arus sekunder 20 kV (A), I_1 adalah arus sekunder 150 kV (A).

6. Percent Slope

Pada *Slope1* memiliki peran penting dalam mengkalkulasikan nilai arus diferensial dan arus *restrain* pada kondisi normal. Fungsi utamanya adalah memastikan sensitivitas rele diferensial saat terjadi gangguan internal dengan arus yang relatif kecil. Di sisi lain, *slope2* berperan untuk mencegah pengaktifan rele diferensial akibat gangguan eksternal dengan tingkat arus gangguan

yang signifikan, yang dapat menyebabkan satu dari dua *current transformer* (CT) mengalami saturasi. Ada dua rumus yang digunakan untuk menghitung nilai $slope_1$ dan $slope_2$:

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (11)$$

$$Slope_2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2\right) \times 100\% \quad (12)$$

Dimana $slope_1$ adalah *setting* kecuraman 1 (%), $slope_2$ adalah *setting* kecuraman 2 (%), I_r adalah arus penahan (pu), I_d adalah arus diferensial (pu).

7. Arus Setting

Untuk mendapatkan nilai arus setting, dilakukan perkalian antara nilai slope dan arus penahan. Berikut adalah rumus matematis yang digunakan untuk mencari nilai $I_{Setting}$.

$$I_{Setting} = \%Slope \times I_r \quad (13)$$

Dimana $I_{Setting}$ adalah arus setting (A), $\%Slope$ adalah *setting* kecuraman (%), I_r adalah arus restrain (A).

8. Gangguan Transformator Daya

Ada beberapa perangkat dalam sistem perlindungan transformator yang berfungsi untuk melindungi transformator dari kerusakan yang mungkin terjadi akibat gangguan internal atau eksternal, seperti kelebihan arus, hubung singkat, dan lonjakan tegangan. Tujuan dari sistem perlindungan ini adalah untuk menjaga transformator tetap terlindungi dan dapat beroperasi secara optimal (Ferdiansyah dkk., 2023). Berikut Persamaan untuk menghitung gangguan:

$$I_{sekunderCT} = I_f \times Rasio CT \quad (14)$$

$$I_{sekunderACT} = \frac{I_{sekunderCT}}{I_s} \quad (15)$$

$$I_d = I_s \text{ fault} - I_s \quad (16)$$

Dimana I_f adalah arus gangguan (A), $I_{sekunderACT}$ adalah arus sekunder CT (A), dan $I_s \text{ fault}$ adalah arus sekunder ketika terjadi gangguan (A), $Rasio CT$ adalah rasio CT yang terpasang (A), I_d adalah arus diferensial (A). I_s adalah arus sekunder (A).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Matematis

Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan matematis yang meliputi perhitungan arus rating dan arus nominal. Perhitungan ini digunakan untuk mendapatkan rasio transformator arus (CT) pada transformator yang sedang diteliti. Selanjutnya, dilakukan perhitungan arus sekunder CT, arus diferensial, arus *restrain*, persentase kecuraman, arus *setting*, serta gangguan yang terjadi pada sistem.

1. Perhitungan Nilai Rasio CT

Arus nominal pada tegangan primer dapat dihitung menggunakan persamaan (1):

$$I_{n1} = \frac{6 \times 10^7}{\sqrt{3} \cdot (1,5 \times 10^5)} = 230,940 \text{ A}$$

Arus nominal pada tegangan sekunder dapat dihitung menggunakan persamaan (2):

$$I_{n2} = \frac{6 \times 10^7}{\sqrt{3} \cdot (2 \times 10^5)} = 1732,051 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, arus nominal yang mengalir ke transformator sisi tegangan primer adalah 230,940 A dan sisi tegangan sekunder 1732,051 A. Selanjutnya menghitung arus rating pada tegangan primer dengan menggunakan persamaan (3):

$$I_{rat} = 110\% \times 230,940 \text{ A} = 54,034 \text{ A}$$

Arus rating pada tegangan sekunder dapat dihitung juga menggunakan persamaan (3):

$$I_{rat} = 110\% \times 1732,051 \text{ A} = 1905,256 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh arus rating transformator daya sebesar 254,034 A di tegangan primer dan sebesar 1905,256 A pada tegangan sekunder. Oleh karena itu, diputuskan menggunakan rasio CT 300/1 A pada sisi tegangan primer dan 2000/5 A pada sisi tegangan sekunder. Dengan rasio CT tersebut, ketika arus mengalir sebesar 300 A pada sisi tegangan primer, akan terbaca 1 A pada CT. Pemilihan rasio CT 300 A dan 2000 A didasarkan pada penggunaan nilai tersebut di Gardu Induk Tanggul dan ketersediaannya di pasaran.

2. Perhitungan Error Mismatch

Perhitungan rasio CT dan *error mismatch* di sisi tegangan primer dapat menggunakan persamaan (4) dan (6):

$$\text{Rasio } CT_1 \text{ (ideal)} = \frac{2000}{5} \times \frac{20}{150} = 53,32 \text{ A}$$

$$\text{Error Mismatch} = \frac{53,32}{300} \% = 0,1777 \%$$

Perhitungan rasio CT dan *error mismatch* di sisi tegangan sekunder dapat menggunakan persamaan (5) dan (6):

$$\text{Rasio } CT_2 (\text{ideal}) = \frac{300}{1} \times \frac{150}{20} = 2250 \text{ A}$$

$$\text{Error Mismatch} = \frac{2250}{2000} \% = 1,125 \%$$

Berdasarkan perhitungan, ditemukan bahwa nilai CT ideal pada CT₁ adalah 53,32 A dengan *error mismatch* sebesar 0,1777%, yang masih berada dalam zona aman. Sementara itu, nilai *error mismatch* pada CT₂ adalah 1,125% dengan CT ideal sebesar 2250 A. Hal ini menunjukkan bahwa CT₂ jauh dari batas maksimal 5% yang ditetapkan oleh PLN. Terdapat perbedaan antara CT yang terpasang dengan CT ideal sebesar 246,68 A pada sisi tegangan primer dan 250 A pada sisi tegangan sekunder.

3. Perhitungan Arus Sekunder CT

Perhitungan arus sekunder pada sisi tegangan 150 kV dan 20 kV menggunakan persamaan (7):

$$I_{\text{sekunder1}} = \frac{1}{300/1} \times 230,940 \text{ A} = 0,7698 \text{ A}$$

$$I_{\text{sekunder2}} = \frac{1}{2000/5} \times 1732,051 \text{ A} = 4,33 \text{ A}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus sekunder pada CT₁ adalah sebesar 0,7698 A dan pada CT₂ adalah sebesar 4,33 A.

4. Perhitungan Arus Diferensial

Dalam perhitungan nilai arus diferensial dapat menggunakan persamaan (9):

$$I_d(pU) = \left| \frac{4,33}{5} - \frac{0,7698}{1} \right| = 0,0962 \text{ pU}$$

Setelah perhitungan, diperoleh nilai arus diferensial sebesar 0,0962 pu sebagai acuan untuk menentukan nilai *setting* rele diferensial.

5. Perhitungan Arus Restrain

Dalam perhitungan nilai arus restrain dapat menggunakan persamaan (10):

$$I_r(pU) = \frac{\frac{0,7698}{1} + \frac{4,33}{5}}{2} = 0,8179 \text{ pu}$$

Dari hasil perhitungan sebelumnya, diperoleh nilai arus penahan sebesar 0,8179 pu. Setelah mendapatkan dan memperhitungkan nilai arus restrain maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai *percent slope*.

6. Perhitungan Percent Slope

Dalam perhitungan nilai *percent slope* dapat menggunakan persamaan (11) dan (12):

$$\text{Slope}_1 = \frac{0,0962}{0,8179} \times 100\% = 11,8 \%$$

$$Slope_2 = \left(\frac{0,0962}{0,8179} \times 2 \right) 100\% = 23,6\%$$

7. Perhitungan Arus Setting

Perhitungan $I_{setting}$ dapat menggunakan persamaan (13):

$$I_{setting} = 11,8\% \times 0,8179 = 0,0965 \text{ pU}$$

Dari perhitungan arus *setting* diferensial, didapatkan nilai 0,0965 pu. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai arus *setting* tersebut telah disesuaikan dengan kondisi ideal, di mana arus diferensial seharusnya nol. Namun, nilai arus *setting* tidak dapat mencapai nol karena terikat oleh rasio *current transformer* (CT) yang telah ditetapkan di pasaran.

8. Perhitungan Gangguan Pada Transformator Daya

Sebagai contoh di data GI/GITET Sistem Jawa Bali semester 2 tahun 2022, terdapat gangguan hubung singkat 3 fasa pada Gardu Induk Tanggul dengan arus gangguan mencapai 5,61 kA. pada sisi 150 kV. Untuk menghitung arus gangguan, digunakan persamaan (14), (15), dan (16):

Arus gangguan pada sisi tegangan 150 kV sebesar 5610 A:

$$I_{sekunderCT} = 5610 \times \frac{1}{300} = 18,7 \text{ A}$$

$$I_{sekunderACT} = \frac{18,7}{0,7698} = 24,292 \text{ A}$$

$$I_d = 24,292 - 0,7698 = 23,52 \text{ A}$$

Arus gangguan pada sisi tegangan primer mencapai 5610 A, menghasilkan arus keluaran sebesar 24,292 A pada CT_1 dan arus diferensial sebesar 23,52 A. Sebagai akibatnya, akan terjadi aktivasi pada rele diferensial dan memerintahkan CB untuk melakukan trip dikarenakan arus diferensial melebihi arus *setting*. Gangguan hubung singkat mengakibatkan nilai I_d mencapai 0,3 A:

$$I_{sekunderACT} = 0,7698 + 0,3 = 1,0698 \text{ A}$$

$$I_{sekunderCT} = 1,0698 \times 0,866 = 0,926 \text{ A}$$

$$I_{n150kV} = 0,926 \times 2000 = 1852 \text{ A}$$

Jika I_d mencapai 0,3 A, jadi arus maksimum yang dapat mengalir di sisi tegangan sekunder adalah 1852 A. Dalam hal ini, arus yang melebihi 1852 A akan memicu rele diferensial. Artinya, rele diferensial akan berfungsi ketika arus yang mengalir melebihi batas arus maksimum tersebut.

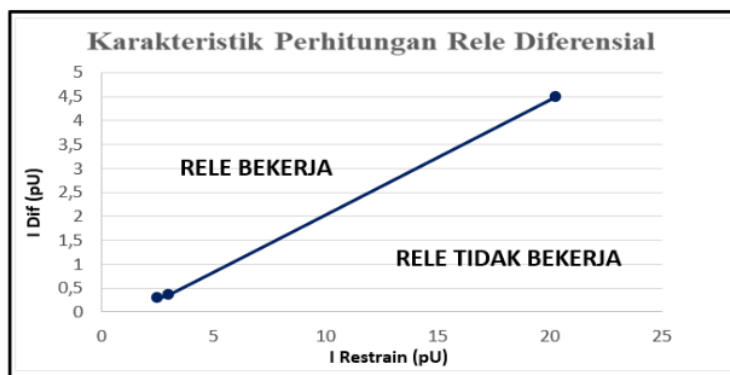
Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian

Dengan membandingkan hasil perhitungan dan pengujian, dapat dievaluasi sejauh mana model matematis dan parameter yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya dalam sistem tenaga listrik yang terpasang di Gardu Induk Tanggul, Jember seperti Tabel 5.

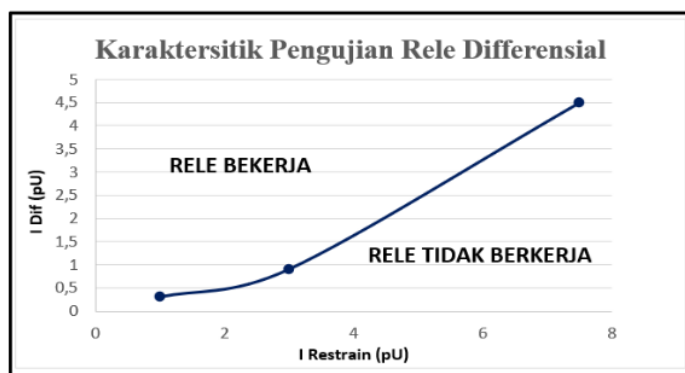
Tabel 5. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Pengujian

	Hasil Perhitungan	Hasil Uji
I_{dif}	0,0962 pU	0,3 pU
$I_{restrain}$	0,8179 pU	0,99 pU
$I_{setting}$	0,3 pU	0,3 pU
$Slope_1$	11,8 %	30 %
$Slope_2$	23,6 %	80 %

Pada Tabel 5 terlihat hasil perbandingan antara perhitungan matematis dan pengujian yang telah dilakukan oleh tim proteksi ULTG Jember. Dalam perhitungan, diperoleh arus diferensial sebesar 0,0962 pU sedangkan pada pengujian, arus diferensial yang dihasilkan adalah 0,3 pU. Idealnya, rele diferensial seharusnya memiliki arus diferensial 0 pU. Arus restrain pada perhitungan dan pengujian juga menunjukkan perbedaan, yaitu 0,8179 pU dan 0,99 pU. Selain itu, perbandingan dilakukan juga terhadap nilai *setting* arus diferensial antara hasil pengujian 0,3 pU dan hasil perhitungan 0,0965 pU, namun nilai *setting* tersebut diubah menjadi 0,3 pU dengan mempertimbangkan aspek keselamatan seperti faktor keamanan (5%), mismatch (4%), arus eksitasi (1%), kesalahan sadapan (10%), dan kesalahan CT (10%). Dalam hal slope, nilai $slope_1$ pada perhitungan adalah 11,8%, sedangkan pada pengujian adalah 30%. Sedangkan untuk nilai $slope_2$, pada perhitungan adalah 23,6%, dan pada pengujian adalah 70%. Dalam melakukan perbandingan antara hasil perhitungan dan pengujian, terdapat perbedaan yang signifikan yang dihasilkan. Perbedaan ini terjadi karena metode perhitungan yang digunakan oleh peneliti, tidak memperhitungkan arus *inrush* dan arus eksitasi yang dapat mempengaruhi nilai slope. Perbedaan yang signifikan dalam nilai slope dapat dijelaskan oleh fakta bahwa PLN melakukan penyetelan berdasarkan aspek keamanan dan menggunakan panduan yang terdapat dalam *manual book* rele diferensial MICOM P643.



(a)



(b)

Gambar 2. Grafik karakteristik: (a) Perhitungan, (b) Pengujian

Gambar 2. pada bagian (a) merupakan gambar grafik karakteristik menggunakan slope perhitungan yang menggunakan besaran $slope_1$ sebesar 11,8% dan $slope_2$ 23,6 %. Sedangkan gambar 3.1 bagian (b) adalah grafik karakteristik hasil pengujian oleh tim proteksi ULTG Jember yang menggunakan besaran $slope_1$ sebesar 30% dan $slope_2$ 80 %. Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh, jika dilakukan penerapan nilai slope pada pengaturan rele diferensial, maka akan terjadi pergeseran pada kemiringan kurva karakteristik, hasil analisis menunjukkan bahwa pergeseran kurva karakteristik pada $slope_1$ membuat rele diferensial menjadi lebih responsif dan lebih cepat dalam merespons arus diferensial. Di sisi lain, $slope_2$ memiliki toleransi yang rendah terhadap arus diferensial transien. Dalam situasi di mana terjadi arus diferensial transien yang seharusnya tidak terdeteksi sebagai gangguan, ini dapat menyebabkan rele diferensial memerintahkan (*Circuit Breaker*) CB untuk melakukan trip. Sedangkan pemilihan slope pada pengujian mempertimbangkan kesalahan tap dan kesalahan rasio CT. Pemilihan slope tersebut juga mempertimbangkan adanya kemungkinan arus diferensial transien yang timbul akibat efek saturasi CT. Serta mengikuti anjuran dari *manual book* rele diferensial MICOM P643. Pengaturan yang terlalu ketat dapat mengakibatkan respons yang tidak relevan atau alarm palsu pada rele diferensial, sementara pengaturan yang terlalu longgar dapat menyebabkan rele tidak merespons gangguan yang sebenarnya.

Simulasi Kinerja Terhadap Gangguan

1. Gangguan di Dalam Zona Proteksi (Internal)

Ketika terjadi gangguan di area yang dilindungi, seperti hubung singkat, akan terjadi peningkatan arus yang signifikan dan tidak seimbang pada kedua sisi rele diferensial. Rele diferensial akan secara responsif mendeteksi perbedaan tersebut dan menghasilkan sinyal yang mengarah kepada pemutus sirkuit (CB) untuk memutus aliran arus dan mengisolasi gangguan.

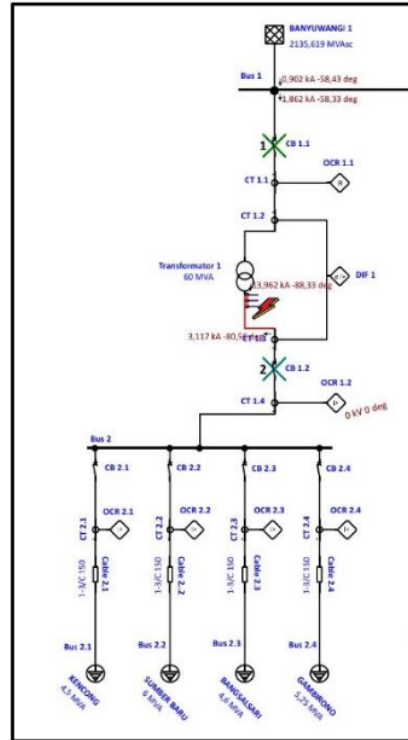
Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT 1.3 & Transformator 1. Adjacent bus: Bus 2

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 06-02-2023

Time (ms)	ID	# (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
0,0	DIF 1		0,0		Phase - 87
60,0	CB 1.1	60,0	60,0		Tripped by DIF 1 Phase - 87
60,0	CB 1.2	60,0	60,0		Tripped by DIF 1 Phase - 87

(a)



(b)

Gambar 3. Gangguan Dalam Zona Proteksi: (a) *Report Analisis*, (b) Urutan Trip CB

Gambar 3 menunjukkan simulasi kinerja rele diferensial di dalam zona proteksi dengan gangguan tiga fasa sebesar 13,962 kA yang diasumsikan adanya hubung singkat pada kumparan didalam transformator yang diakibatkan oleh isolasi yang rusak atau sudah usang. Saat terjadi hubung singkat tersebut rele diferensial berhasil bekerja dan membaca gangguan tersebut secara instan dengan waktu 0 ms dan memicu trip CB 1.1 dan CB 1.2 secara bersamaan dengan waktu 60 ms Sedangkan rele OCR yang bekerja sebagai rele *backup* tidak bekerja dikarenakan CB 1.1 dan CB 1.2 telah trip terlebih dahulu diperintahkan oleh rele diferensial. Dalam hal ini transformator II, III mengalami sedikit penurunan tegangan atau merasakan adanya gangguan sebesar 0,038 kA pada transformator II dan 0,02 kA pada transformator III akan tetapi rele pada

kedua transformator tersebut tidak melakukan trip karena gangguan terjadi di luar daerah pengamanan rele diferensial. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, rele diferensial hanya bekerja dalam batas-batas tertentu yang dibatasi oleh dua CT, yaitu CT primer atau sisi tegangan 150 kV dan CT sekunder pada sisi tegangan 20 kV, dan fungsinya adalah melindungi transformator, yaitu transformator I pada percobaan gangguan tersebut.

2. Gangguan di Luar Zona Proteksi (External)

Dalam situasi ketika terjadi gangguan di luar wilayah perlindungan, rele diferensial akan kehilangan fungsinya sebagai perlindungan. Oleh karena itu diperlukan adanya rele backup untuk memproteksi transformator.

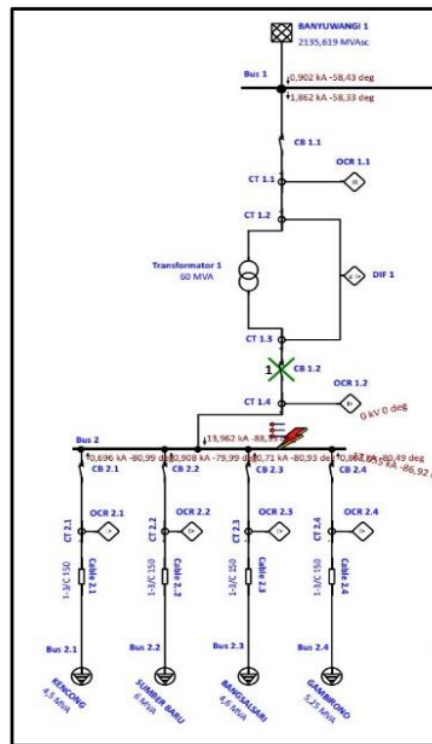
Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus 2

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 06-02-2023

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
70.2	OCR 1.2	13.962	70.2		Phase - OC1 - 51
130	CB 1.2		60.0		Tripped by OCR 1.2 Phase - OC1 - 51

(a)



(b)

Gambar 4. Simulasi Gangguan di Luar Zona Proteksi (a) *Report Analisis*, (b) *Urutan Trip CB*

Hasil simulasi pada gambar 4 menunjukkan terjadinya gangguan tiga fasa di luar zona pengaman rele diferensial yaitu pada busbar 20 kV. Rele OCR beroperasi dan memberikan instruksi kepada CB untuk melakukan tindakan perlindungan kepada transformator. Informasi yang dapat diperoleh menunjukkan bahwa rele OCR 1.2 mendeteksi adanya gangguan arus hubung singkat sebesar 13.962 kA pada waktu 70,2 ms, dan instruksi diberikan kepada CB 1.2 untuk beroperasi pada waktu 130 ms. Dalam simulasi ini, terlihat bahwa rele diferensial tidak berfungsi karena terjadi gangguan tiga fasa di luar zona pengaman rele diferensial.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan secara matematis nilai arus setting yang dihasilkan adalah 0,0962 pU. Namun, untuk memenuhi aspek keselamatan, arus setting tersebut disesuaikan dengan nilai 0,3 pU. Jika dibandingkan, hasil perhitungan memiliki sedikit perbedaan karena dalam perhitungan peneliti tidak memperkirakan arus inrush maupun arus eksitasi. Dan penggunaan slope hasil perhitungan ini kurang cocok diterapkan karena memiliki sensitivitas yang lebih tinggi pada slope1, dan toleransinya terhadap arus diferensial transien lebih rendah pada slope2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem proteksi diferensial pada transformator I Gardu Induk Tanggul beroperasi sesuai dengan yang diharapkan, yaitu melindungi transformator dari gangguan yang terjadi di dalam daerah pengaman dan tidak terpicu oleh gangguan di luar daerah pengaman. Untuk penelitian berikutnya, perlu dilakukan pengembangan dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat satu fasa yang lebih umum terjadi dalam kondisi lapangan, mengingat penelitian ini hanya membatasi arus gangguan hubung singkat tiga fasa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada bagian ini, ingin peneliti menyampaikan apresiasi yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi penting dalam penyelesaian penelitian ini. Peneliti mengucapkan rasa terima kasih kepada tim editorial "Seminar Nasional Hasil Riset Dan Pengabdian" atas kesempatan yang diberikan untuk mempublikasikan hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, I. (2016). Differential Protection for Power Transformer Using Relay. *International Journal of Trend in Research and Development*, 3(1), 2394–9333.
- Aita Diantari, R., & Mardhi Rahmatullah, T. (2017). ANALISA PROTEKSI DIFFERENSIAL PADA GENERATOR DI PLTU SURALAYA. *JURNAL ENERGI & KELISTRIKAN*, 9(1).
- Andreev, M., Gusev, A., Sulaymanov, A., & Borovikov, Y. (2017). Setting of Relay Protection of Electric Power Systems Using Its Mathematical Models. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*.
- Aziz, R. (2022). *Analisis Penyetelan Rele Diferensial Sebagai Sistem Proteksi Transformator 60 MVA Di Gardu Induk Jajar 150KV/22KV*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.

- 11 Fauzi, A., Gede Dyana Arjana, I., & Gede Indra Partha, C. (2020). *PERANCANGAN SISTEM PENGAMAN BUSBAR 150 KV MENGGUNAKAN RELE DIFERENSIAL DI GARDU INDUK SANUR* (Vol. 7, Nomor 2).
- 6 Ferdiansyah, Subhan, & Nazaruddin. (2023). *STUDI PENGGUNAAN RELE DIFFERENSIAL TYPE P642 SEBAGAI PROTEKSI PADA TRANSFORMATOR DAYA 30 MVA GARDU INDUK PANTON LABU PT. PLN (PERSERO) ACEH UTARA. JURNAL TEKTRON, 7(1)*.
- Firmansyah, A., Suyadi, A., & Bintang Satriaoktarian, M. (2022). *Unjuk Kerja Over Current Relay Pada Incoming dan Outgoing Transformer Daya 1 60 MVA Gardu Induk Kenten menggunakan ETAP 19.0.1. Jurnal TEKNO, 19(1)*.
- Hendratmoko, A., & Supardi, A. (2021). *Analisis Kinerja Proteksi Relai Diferensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk 150 KV Blora Menggunakan Software ETAP 12.6.0* [Universitas Muhammadiyah Surakarta]. <http://eprints.ums.ac.id/93263/>
- 12 jeckson, Sattari, A., & Widodo, H. (2021). *Analisis Setting Arus Relai Diferensial Pada Trafo II 30 MVA PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 3(1)*.
- Keumala, D., Bintoro, A., Salahuddin, S., & Yusdartono, H. M. (2021). *ANALISIS PENGGUNAAN RELE DIFERENSIAL SEBAGAI PROTEKSI TRANSFORMATOR 66 MVA DI PLTMG SUMBAGUT 2 PEAKER POWER PLANT 250 MW. Jurnal Energi Elektrik, 9(2), 9.* <https://doi.org/10.29103/jee.v10i1.4221>
- 10 Prasetyo, A., Slamet, P., & Basyarach, N. A. (2022). *STUDI KOORDINASI PROTEKSI OVER CURRENT RELAY DI PABRIK II PT. PETROKIMIA GRESIK. Prosiding Senakama.*
- 7 Prasetyo, N. (2022). *Analisa Pengaturan Proteksi Rele Diferensial Pada Transformator Daya II Gardu Induk Kota Baru. JURNAL S1 TEKNIK ELEKTRO UNTAN, 2(1)*.
- 16 Putra, D. Cahyana, & Bahcrah, A. (2021). *SIMULASI GANGGUAN RELAY DIFFERENTIAL TRAFU PADA SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN ETAP 12.6. Seminar Nasional Fortei7-4, 4(1)*.
- 8 Sahnur Nasution, E., Irsan Pasaribu, F., & Arfianda, M. (2019). *Rele Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Pada Gardu Induk. READY STAR, 2(1)*.
- 15 Subari, A., & Hapsari Kusumastuti, D. (2015). *SETTING RELAY DIFFERENSIAL PADA GARDU INDUK KALIWUNGU GUNA MENGHINDARI KEGAGALAN PROTEKSI. TRANSMISI, 17(3)*.
- 5 Utomo, H. B., & Ilham, M. (2021, Agustus 4). *Analisa Sistem Proteksi Rele Diferensial Pada Trafo 60 MVA Di Gardu Induk Bandung Utara Menggunakan Software ETAP 12.6.0. Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar.*

Jurnal Adi Buana_Fajar Sukarno Aji Pandawa

ORIGINALITY REPORT

18%

SIMILARITY INDEX

18%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

9%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	eprints.ums.ac.id Internet Source	5%
2	repositori.umsu.ac.id Internet Source	3%
3	snhrp.unipasby.ac.id Internet Source	2%
4	journal.binadarma.ac.id Internet Source	1%
5	jurnal.polban.ac.id Internet Source	1%
6	e-jurnal.pnl.ac.id Internet Source	<1%
7	jurnal.untan.ac.id Internet Source	<1%
8	Submitted to Cerritos College Student Paper	<1%
9	Submitted to Universitas Jember Student Paper	<1%

10	conference.untag-sby.ac.id Internet Source	<1 %
11	ojs.unud.ac.id Internet Source	<1 %
12	journal.uml.ac.id Internet Source	<1 %
13	repository.uin-suska.ac.id Internet Source	<1 %
14	Submitted to Universitas Muhammadiyah Surakarta Student Paper	<1 %
15	repository.um-palembang.ac.id Internet Source	<1 %
16	journal.fortei7.org Internet Source	<1 %
17	Submitted to Universitas Islam Indonesia Student Paper	<1 %
18	eproceeding.itenas.ac.id Internet Source	<1 %
19	text-id.123dok.com Internet Source	<1 %
20	core.ac.uk Internet Source	<1 %
21	jurnal.um-palembang.ac.id	

Internet Source

<1 %

22

repository.its.ac.id

Internet Source

<1 %

23

ejournal.itats.ac.id

Internet Source

<1 %

24

repository.univ-tridinanti.ac.id

Internet Source

<1 %

25

stt-pln.e-journal.id

Internet Source

<1 %

26

www.neliti.com

Internet Source

<1 %

27

www.univ-tridinanti.ac.id

Internet Source

<1 %

28

repository.unitomo.ac.id

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches Off

Exclude bibliography On