

Analisa Harmonisa Transformator Satu Fasa Berbeban Motor Arus Searah Melalui *Rectifier* Dan Simulasi Filter Pasif Berbasis MATLAB Di Laboratorium Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia

¹Helda Oktavianti Dangan*, ²Eva Magdalena Silalahi, ³Robinson Purba
^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Jakarta
^{1,2,3}Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta
*Corresponding author: helda.bky01@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis harmonisa transformator satu fasa yang dibebani dengan Motor Arus Searah (MAS) dan penyearah dengan menggunakan pendekatan metode kuantitatif. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi nilai *Total Harmonic Distortion* untuk arus (THDi) pada transformator dan merancang filter pasif guna mengurangi tingkat harmonisa apabila tidak memenuhi standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil pengukuran, diperoleh THDi 31,01% pada transformator beban nol, pada transformator dengan beban MAS dengan penyearah setengah gelombang, THDi sebesar 79,35%, dan pada transformator berbeban MAS dengan penyearah gelombang penuh, THDi sebesar 46,40%, yang melebihi standar IEEE 519-2014. Hasil simulasi filter pasif single tuned LC menunjukkan bahwa pada transformator berbeban MAS dengan penyearah setengah gelombang mengalami penurunan tingkat harmonisa dari nilai THDi 79,35% sebelum menggunakan filter, menjadi 1,04% setelah menggunakan filter dan memenuhi standar IEEE 519-2014. Tingkat harmonisa dari transformator berbeban MAS dengan penyearah gelombang penuh, sebelum difilter, THDi 46,40%, namun setelah difilter, THDi 37,98%, masih melebihi standar IEEE 519-2014.

Kata Kunci: filter pasif single tuned, harmonisa, standar IEEE 519-2014, transformator

Abstract

This study analyzed the harmonics of single-phase transformers loaded with Direct Current Motor (MAS) and rectifier using quantitative method approach. The purpose of this study was to identify the Total Harmonic Distortion (THDi) value in transformers and design passive filters to reduce harmonic levels if they do not meet the standards. The results showed that the measurement results, obtained THDi 31.01% in zero-load transformers, in transformers with MAS load with half-wave rectifiers, THDi by 79.35%, and in MAS load transformers with full-wave rectifiers, THDi by 46.40%, which exceeded IEEE 519-2014 standards. The results of the single tuned LC passive filter simulation showed that the MAS loaded transformer with a half-wave rectifier decreased harmonic level from the THDi value of 79.35% before using the filter, to 1.04% after using the filter and met IEEE 519-2014 standards. The harmonic level of MAS loaded transformer with full wave rectifier, before filtering, THDi 46.40%, but after filtering, THDi 37.98%, still exceeds IEEE 519-2014 standard.

Keywords: single tuned passive filter, harmonic, IEEE 519-2014 standard, transformer

1. PENDAHULUAN

Saat ini, listrik telah menjadi kebutuhan utama yang erat hubungannya dengan kehidupan manusia. Oleh sebab itu, perlu suatu sistem tenaga listrik yang dapat mengalirkan listrik dengan andal, efisien, dan memiliki kualitas yang tinggi^[1]. Jaringan listrik didesain untuk beroperasi pada frekuensi 50Hz atau 60Hz. Namun, pada penggunaannya, beberapa beban dapat mengakibatkan timbulnya arus atau tegangan dengan frekuensi harmonisa. Frekuensi harmonisa dapat menyebabkan penurunan efisiensi atau menyebabkan kerugian daya yang signifikan dalam sistem^[2].

Pada umumnya, beban dari sistem tenaga listrik terbagi menjadi dua jenis, yaitu beban linier dan beban non-linier. Beban non-linier menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan berbeda. Fenomena ini terjadi karena adanya distorsi pada gelombang yang terbentuk oleh timbulnya harmonisa^[3]. Dalam sistem tenaga listrik, harmonisa dapat berdampak negatif pada transformator karena transformator berada pada posisi yang paling dekat dengan beban^[4].

Penerapan beban non-linier pada transformator dapat mengakibatkan munculnya harmonisa yang berpengaruh pada peningkatan rugi-rugi, penurunan efisiensi, dan penurunan masa pakai transformator. Untuk mengatasi masalah harmonisa digunakan filter harmonisa, terutama filter pasif. Dengan merancang filter pasif menggunakan simulink pada transformator daya, terbukti bahwa penggunaan filter pasif efektif dalam menurunkan nilai THD_i. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa, nilai THD_i pada fase R dapat berkurang menjadi 3,3% dari 6%, fase S dari 6,6% menjadi 4,47%, dan fase T menjadi 4,07% dari 6,2%. Dengan demikian, hasil penelitian tersebut memenuhi standar IEEE 519-2014 yang

menetapkan nilai maksimum THD_i sebesar 5%^[5].

Hasil penelitian harmonisa pada transformator 1 dan transformator 3 di gedung perkantoran, Sudirman Central Business District, menunjukkan perbandingan tingkat harmonisa antara hari kerja dan hari libur. Pada hari kerja, transformator 1 dan transformator 3 memiliki tingkat THD_i yang tinggi, yaitu masing-masing sebesar 25,27% dan 22,32%. Sementara pada hari libur, transformator 1 memiliki tingkat THD_i sebesar 17,24%, tidak memenuhi standar IEEE 519-1992. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa, pada hari libur, THD_i transformator mengalami penurunan, walaupun masih belum memenuhi standar. Hal ini diperkirakan akibat dari penggunaan beban non-linier yang terbatas^[6].

Hasil pengujian pada mesin arus searah fan *test* dengan penyearah satu fasa, yaitu thyristor dan dioda, mencapai tingkat harmonisa 6,7%, melebihi 5% untuk tegangan bus antara 1 kV dan 69 kV. Tingkat harmonisa tersebut tercatat selama pengujian motor dengan vibrasi mencapai 2,8 mm/s dan kecepatan 1618 rpm^[7].

Beban seperti transformator, penyearah mesin-mesin listrik termasuk mesin arus searah, merupakan beban yang bersifat non-linier yang menghasilkan harmonisa dan beban ini, sering ditemukan pada sistem tenaga listrik. Transformator yang dibebani dengan mesin arus searah menggunakan rangkaian penyearah, diperkirakan menghasilkan distorsi harmonisa yang tidak memenuhi standar. Pengukuran tingkat harmonisa terhadap transformator 1 fasa yang dibebani dengan mesin arus searah, menggunakan rangkaian penyearah, dilakukan di Laboratorium Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas

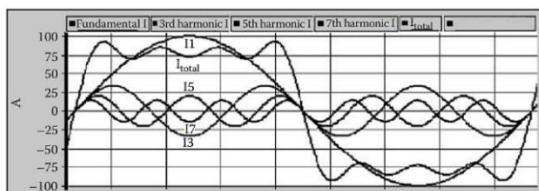
Kristen Indonesia, Jakarta. Dalam kajian ini standar yang digunakan, adalah standar IEEE 519-2014. Apabila tingkat harmonisa tidak memenuhi standar IEEE 519-2014, perlu dilakukan penurunan tingkat harmonisa pada transformator melalui simulasi filter pasif menggunakan MATLAB/Simulink.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Harmonisa

Harmonisa pada sinyal listrik mengacu pada komponen sinyal yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi dasar, seperti yang terlihat pada gambar 1 [8].

Gambar 1 memperlihatkan gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat ganjil yaitu kelipatan dari tiga (I_3), lima (I_5), dan tujuh (I_7) terhadap gelombang frekuensi dasar (I_1). Apabila gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat ganjil dijumlahkan terhadap frekuensi dasar, akan menghasilkan gelombang yang mengalami distorsi (I_{total}) [8].



Gambar 1 Bentuk Gelombang Sinusoidal Terdistorsi [8]

2.2 Beban Linier

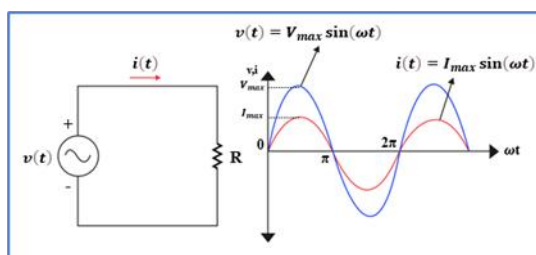
Beban linier merupakan jenis beban yang menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang sama [9]. Beberapa contoh beban linier meliputi pemanas, setrika li strik, lampu pijar, dan lain sebagainya [8]. Gambar 2 menunjukkan rangkaian beban linier dengan beban resistor (R) yang terhubung dengan sumber tegangan bolak-balik sinusoidal $v(t)$. Arus yang mengalir ke beban

ditandai dengan $i(t)$, dan tampak bahwa gelombang tegangan sumber dan arus beban berbentuk sinusoidal.

Bentuk fungsi tegangan dan arus pada rangkaian gambar 2, dinyatakan oleh persamaan (1) dan (2) [8].

$$v(t) = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t) \quad (2)$$



Gambar 2 Rangkaian Beban Linier

Keterangan:

$v(t)$ = tegangan sumber

$i(t)$ = arus yang mengalir pada beban linier
 V_{\max} = harga maksimum dari tegangan (volt)

I_{\max} = harga maksimum dari arus (ampere)
 $\sin(\omega t)$ = fungsi sinus dari sudut ωt

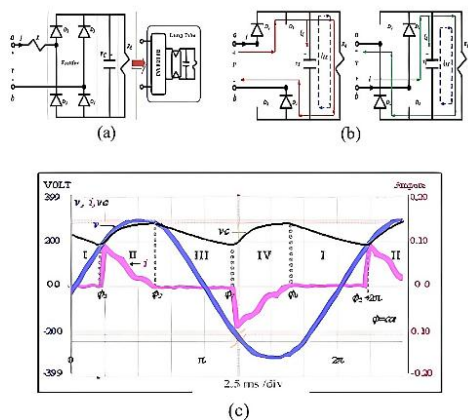
ω = frekuensi angular (rad/s)

t = waktu (detik)

2.3 Beban Non-Linier

Beban non-linier merupakan jenis beban yang menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan berbeda [9]. Contoh dari beban non-linier antara lain konverter daya, komputer, *Uninterruptible Power Supply* (UPS), pengaturan kecepatan motor arus searah, dan tungku busur api [8]. Gambar 3(a), memperlihatkan rangkaian beban non-linier yang terdiri dari empat dioda (D_1, D_2, D_3, D_4) dengan arus masukan i , tegangan masukan v , dan tegangan keluaran searah (tegangan pada kapasitor V_c). Rangkaian ini juga menggunakan *Compact Fluorescent Lamp* (CFL) sebagai beban. Gambar 3(b), memperlihatkan siklus arus bolak-balik yang mengalir dalam rangkaian. Gambar 3(c) terlihat gelombang tegangan

berbentuk sinusoidal (biru) dan arus berbentuk non-sinusoidal (pink).



Gambar 3 Rangkaian Beban Non-Linier^[10]

2.4 Total Harmonic Distortion (THD)

THD merupakan indeks yang mengukur nilai efektif komponen harmonisa pada gelombang yang mengalami distorsi. THD merupakan persentase dari total nilai efektif (*Root Mean Square*) dari semua komponen harmonisa terhadap sinyal fundamental. Untuk menghitung THD dari gelombang tegangan, digunakan persamaan (3)^[11].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3)$$

Keterangan:

V_h = nilai tegangan harmonisa pada frekuensi harmonisa "h"

V_1 = nilai fundamental tegangan

h = orde harmonisa (2,3,4,5,...)

Untuk menghitung THD dari gelombang arus, digunakan persamaan (4)^[11].

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (4)$$

Keterangan:

I_h = nilai arus harmonisa pada frekuensi harmonisa "h"

I_1 = nilai fundamental arus

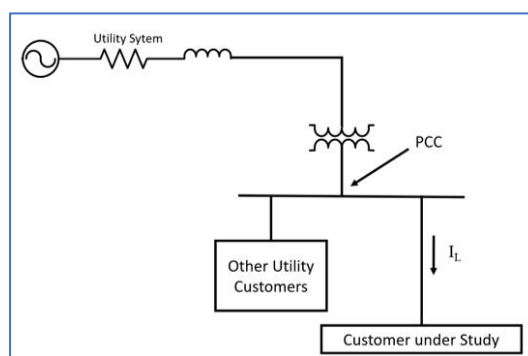
h = orde harmonisa (2,3,4,5,...)

2.5 Standar Harmonisa

Menurut standar IEEE 519-2014, terdapat dua parameter yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yaitu batas untuk harmonisa tegangan (THD_V) dan arus (THD_I). Batas standar untuk THD_V ditentukan berdasarkan tegangan sistem yang digunakan. Sementara itu, untuk menentukan batas standar THD_I , terlebih dahulu perlu diketahui rasio I_{sc}/I_L ^[12].

2.6 Prosedur Menentukan Rasio I_{sc}/I_L

Gambar 4 menunjukkan PCC (*Point of Common Coupling*) yang merupakan sambungan antara utilitas dan pelanggan untuk membatasi terjadinya harmonisa, dan merekomendasikan tindakan pencegahan tingginya tingkat harmonisa^[9].



Gambar 4 PCC Pada Transformator^[9]

Berikut adalah prosedur untuk menentukan rasio hubung-pendek (*short-circuit ratio*) I_{sc}/I_L sebagai berikut:

1. Menentukan arus hubung-pendek (I_{sc}) dapat menggunakan persamaan (5)^[9].

$$I_{sc} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \text{ kV}} \quad (A) \quad (5)$$

Keterangan:

I_{sc} = arus hubung-pendek

MVA = kapasitas daya transformator

kV = tegangan fasa-fasa pada PCC

2. Menentukan kebutuhan daya beban rata-rata P_D (kW) dalam 12 bulan terakhir, dimana datanya dapat diperoleh dari data tagihan biaya listrik.
3. Setelah diketahui kebutuhan daya beban rata-rata, maka dapat dihitung

arus beban rata-rata (I_L) dengan menggunakan persamaan (6)^[9].

$$I_L = \frac{kW}{PF \sqrt{3} kV} \quad (A) \quad (6)$$

Keterangan:

I_L = arus beban rata-rata

PF = faktor daya

kW = total daya rata-rata

4. Selanjutnya, diperoleh rasio hubungan-pendek I_{sc}/I_L menggunakan persamaan (7)^[9].

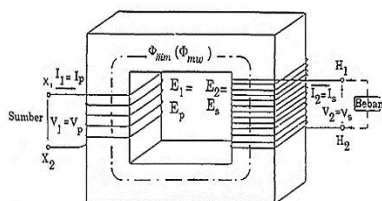
$$\text{Rasio hubungan-pendek} = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (7)$$

Rasio hubungan-pendek I_{sc}/I_L pada persamaan (7), digunakan untuk menentukan batas arus harmonisa pada standar IEEE 519-2014.

2.7 Transformator

Transformator memiliki peran dalam memindahkan energi listrik dari satu sirkuit ke sirkuit lainnya tanpa perubahan frekuensi dan mengubah tegangan maupun arus listrik. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana terbentuk hubungan magnetik antara kumparan primer dan sekunder. Hubungan magnetik ini biasanya terbentuk melalui inti besi yang berfungsi sebagai tempat untuk melakukan fluks bersama^[13].

Gambar 5 menunjukkan transformator ideal, dimana sisi belitan X_1 - X_2 merupakan tegangan rendah dan sisi belitan H_1 - H_2 merupakan tegangan tinggi. Transformator ideal adalah transformator yang diasumsikan tidak memiliki rugi inti dan rugi tembaga^[14].



Gambar 5 Transformator Ideal^[14]

Pada dasarnya bahwa, transformator

yang dioperasikan dengan beban, terjadi rugi besi pada inti dan rugi tembaga pada belitan (baik sisi primer maupun sisi sekunder) yang tidak bisa diabaikan sepenuhnya^[14].

2.8 Motor Arus Searah (MAS)

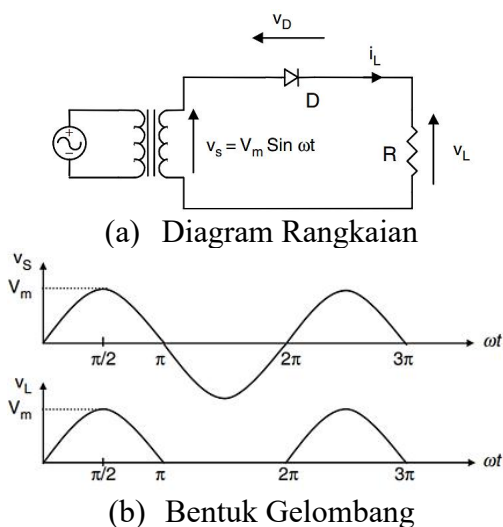
MAS berperan dalam mengkonversi listrik arus searah menjadi gerakan berputar pada rotor. MAS banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari di berbagai aplikasi seperti mainan anak-anak, motor starter pada mobil, *tape recorder*, dan lain sebagainya. Di sektor industri dan pabrik, MAS banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti *elevator*, traksi, trem listrik, *conveyer*, mesin penggiling, mesin pengaduk, mesin pencetak, mesin pengemas, dan lain sebagainya^[15].

Prinsip kerja MAS berdasarkan Hukum Lorentz yang menyatakan bahwa “*apabila penghantar listrik mengalir arus dalam medan magnet, akan timbul gaya pada kawat penghantar tersebut*”. Gaya yang terjadi dalam keadaan ini disebut gaya Lorentz. Gaya Lorentz berperan menggerakkan rotor dari motor listrik dalam bentuk putaran^[16].

2.9 Penyearah Setengah Gelombang Satu Fasa

Penyearah setengah gelombang satu fasa merupakan salah satu rangkaian penyearah sederhana yang umum digunakan dalam aplikasi elektronika. Gambar 6(a) menggambarkan penyearah setengah gelombang satu fasa dengan beban resistif. Rangkaian ini berfungsi untuk mengubah tegangan dan arus bolak-balik menjadi tegangan dan arus searah menggunakan satu dioda yang dihubungkan dengan sisi sekunder transformator. Prinsip kerja dari penyearah setengah gelombang adalah ketika tegangan sekunder transformator

mengalami siklus positif sebagai sinyal masukan, dioda (D) akan berada dalam kondisi *forward* bias sehingga arus (i) mengalir ke dalam beban (R). Tetapi, ketika tegangan sekunder mengalami siklus negatif, dioda (D) berbias mundur sehingga arus tidak mengalir ke dalam beban. Gambar 6(b) menunjukkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan keluaran^[17].



(a) Diagram Rangkaian
(b) Bentuk Gelombang
Gambar 6 Penyearah Setengah Gelombang Satu Fasa^[17]

Keterangan:

D : dioda

v_D : tegangan dioda

i_L : arus keluaran dari penyearah

v_L : tegangan keluaran dari penyearah

R : resistor

v_s : tegangan sekunder

V_m : harga maksimum dari tegangan

$\sin(\omega t)$: fungsi sinus dari sudut ωt

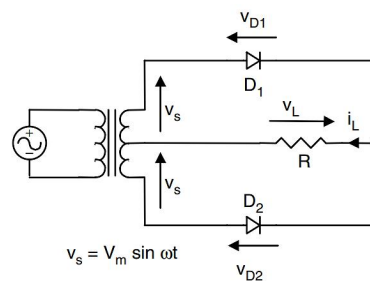
ω : frekuensi angular (rad/s)

t : waktu dalam detik

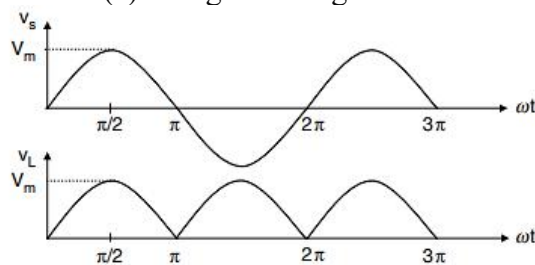
2.10 Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa

Terdapat dua jenis penyearah gelombang penuh satu fasa, yaitu penyearah gelombang penuh dengan transformator *center-tapped* dan

penyearah jembatan. Penyearah gelombang penuh dengan transformator *center-tapped* ditunjukkan pada gambar 7(a). Pada transformator *center-tapped*, lilitan sekunder terbagi menjadi dua sisi yang terpisah pada titik tengahnya. Dalam rangkaian gambar 7(a), setiap dioda bersama dengan setengah transformator yang terhubung berfungsi sebagai penyearah setengah gelombang. Selama setengah siklus gelombang sinusoidal masukan, hanya satu sisi lilitan sekunder yang terhubung ke beban, sedangkan sisi lainnya terputus. Selama setengah siklus positif, dioda penyearah terhubung ke satu sisi lilitan sekunder dan mengizinkan arus mengalir ke beban. Selama setengah siklus negatif, dioda penyearah terhubung ke sisi lilitan sekunder yang berlawanan dan arus mengalir ke beban melalui jalur yang berbeda. Keluaran dari kedua penyearah setengah gelombang tersebut kemudian digabungkan melalui titik tengah transformator untuk menghasilkan penyearah gelombang penuh yang kemudian diteruskan ke beban. Gambar 7(b) menunjukkan gelombang tegangan masukan dan tegangan keluaran^[17].



(a) Diagram Rangkaian



(b) Bentuk Gelombang

Gambar 7 Penyearah Gelombang Penuh Dengan Transformator *Center-Tapped*^[17]

Keterangan:

D_1 : dioda 1

v_{D1} : tegangan dioda 1

D_2 : dioda 2

v_{D2} : tegangan dioda 2

i_L : arus keluaran dari penyearah

v_L : tegangan keluaran dari penyearah

R : resistor

v_s : tegangan sekunder

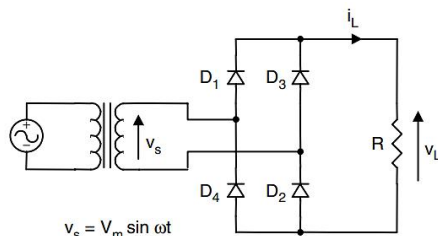
V_m : harga maksimum dari tegangan

$\sin(\omega t)$: fungsi sinus dari sudut ωt

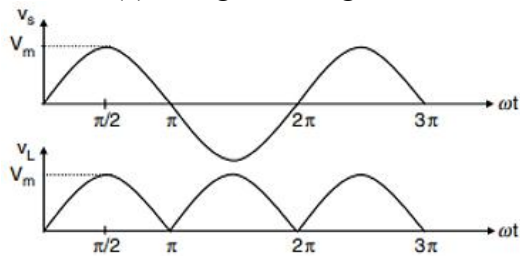
ω : frekuensi angular (rad/s)

t : waktu dalam detik

Pada penyearah jembatan, digunakan empat dioda, sehingga dapat terbentuknya gelombang penuh tanpa perlu menggunakan transformator *center-tapped*. Gambar 8(a) menunjukkan rangkaian jembatan penyearah gelombang penuh. Selama setengah siklus positif dari tegangan sekunder transformator, arus mengalir menuju beban melalui dioda D_1 dan D_2 . Selama setengah siklus negatif, arus mengalir menuju beban melalui dioda D_3 dan D_4 . Gambar 8(b) menunjukkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan keluaran^[17].



(a) Diagram Rangkaian



(b) Bentuk Gelombang

Gambar 8 Jembatan Penyearah Gelombang Penuh^[17]

Keterangan:

D_1 : dioda 1

v_{D1} : tegangan dioda 1

D_2 : dioda 2

v_{D2} : tegangan dioda 2

D_3 : dioda 3

v_{D3} : tegangan dioda 3

D_4 : dioda 4

v_{D4} : tegangan dioda 4

i_L : arus keluaran dari penyearah

v_L : tegangan keluaran dari penyearah

R : resistor

v_s : tegangan sekunder

V_m : harga maksimum dari tegangan

$\sin(\omega t)$: fungsi sinus dari sudut ωt

ω : frekuensi angular (rad/s)

t : waktu dalam detik

2.11 Filter Pasif

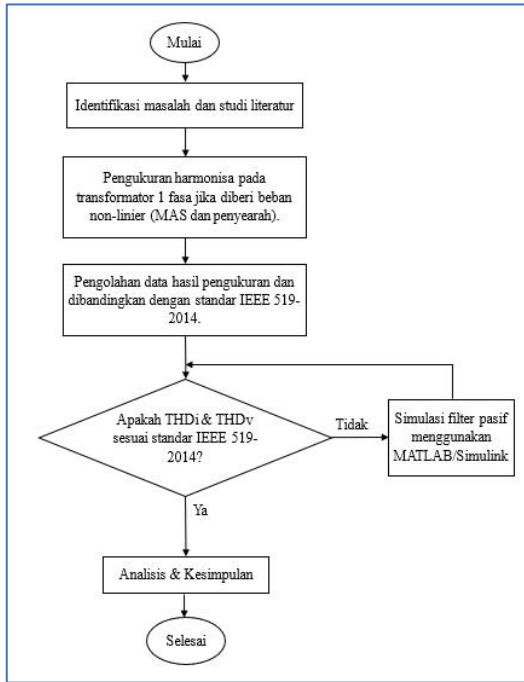
Filter pasif sering digunakan untuk mengurangi nilai harmonisa. Filter pasif memiliki beberapa komponen pasif seperti resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C). Cara kerja filter ini adalah dengan mengalirkan arus harmonisa pada tingkat yang ditentukan dari sumber harmonisa, seperti beban non-linier, melalui rangkaian filter. Agar mencapai arus yang mengalir pada tingkat tertentu, kapasitor harus diatur sedemikian rupa sehingga terjadi resonansi pada rangkaian, mengakibatkan penurunan impedansi pada saluran sehingga hanya menyisakan komponen resistansi saja. Filter pasif tidak hanya berfungsi untuk mereduksi harmonisa, namun juga bisa membantu meningkatkan faktor daya dalam sistem^[9], [18].

3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif. Data yang dikumpulkan

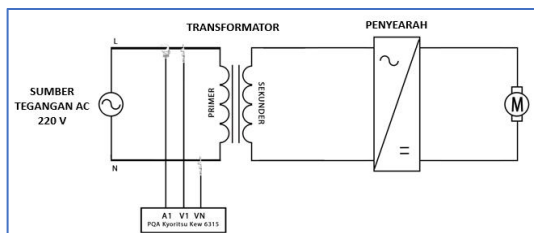
berupa angka-angka, kemudian diolah dan melakukan analisis terhadap hasil pengolahan data^[19].

Dalam melaksanakan penelitian, terdapat beberapa langkah yang bertujuan untuk mempermudah proses penelitian dan akan diilustrasikan dalam gambar 9.



Gambar 9 Diagram Alir Penelitian

Rangkaian pengukuran tingkat harmonisa, diperlihatkan pada gambar 10. Tranformator dibebani dengan MAS melalui rangkaian penyearah. Pengukuran menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer* (PQA) Kyoritsu KEW 6315^[20].



Gambar 10 Rangkaian Pengujian dan Pengukuran Berdasarkan Quick Manual PQA Kyoritsu KEW 6315

Keterangan:

L : kawat fasa

N : kawat netral

~ : tegangan bolak-balik

= : tegangan searah

M : motor arus searah

PQA Kyoritsu KEW 6315 : alat ukur THD_v dan THD_i

A1 : *clamp* arus

V1 : *clamp* tegangan fasa ke fasa

VN : *clamp* tegangan netral

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran

Tabel 1 menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan arus, serta spektrum arus hasil pengukuran pada tiga kondisi transformator menggunakan alat ukur PQA Kyoritsu KEW 6315.

Tabel 1 Gelombang Tegangan dan Arus Hasil Pengukuran

No.	Kondisi Transformator	Gelombang Tegangan	Gelombang Arus	Spektrum Arus
1.	Transformator Beban Nol			
2.	Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang			
3.	Transformator Berbeban Dengan Penyearah Gelombang Penuh			

4.2 Menentukan Batas THD Maksimum

Dalam menentukan batas distorsi arus harmonisa sesuai dengan standar IEEE 519-2014, perlu untuk terlebih dahulu menentukan nilai rasio I_{sc}/I_L sesuai dengan persamaan (5) dan (6). Nilai rasio I_{sc}/I_L ditentukan berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2011), yaitu 1,45^[21]. Berdasarkan standar IEEE 519-2014, untuk nilai rasio I_{sc}/I_L kurang dari 20, batas maksimum THDi adalah 5,0% dan nilai maksimum harmonisa

individu untuk orde harmonisa: $3 \leq$ orde harmonisa ($h \ll 11$, adalah $4,0\%$ ^[12].

Menentukan batas distorsi tegangan harmonisa THD_v sesuai Standar IEEE 519-2014, langkahnya sama dengan THDi. Oleh karena itu, diperoleh batas maksimum THD_v untuk sistem tegangan ≤ 1 kV sebesar $8,0\%$, dan nilai maksimum harmonisa individu adalah sebesar $5,0\%$ ^[12].

4.3 Pengolahan Data Hasil Pengukuran

Tabel 2 memperlihatkan data hasil pengukuran THDi dari orde 1 sampai orde 10 pada kondisi transformator beban nol. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (4), didapatkan total THDi sebesar $31,01\%$, tidak memenuhi standar. Selain itu, terdapat arus harmonisa yang dominan pada orde 3 dengan THDi $30,77\%$, tidak memenuhi standar.

Tabel 2 THDi Orde 1-10 Hasil Pengukuran Pada Transformator Beban Nol

Orde	Arus Pengukuran (A)	THDi Orde Ke-n (%)	Standar IEEE 519-2014 (4,0%)
1	0,026 $\angle 73,86^\circ$	100	-
2	0,000 $\angle -84,72^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
3	0,008 $\angle 78,75^\circ$	30,77	Tidak Memenuhi Standar
4	0,000 $\angle -80,82^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
5	0,001 $\angle 101,04^\circ$	3,85	Memenuhi Standar
6	0,000 $\angle -76,92^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
7	0,000 $\angle -74,97^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
8	0,000 $\angle -73,02^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
9	0,000 $\angle -71,07^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
10	0,000 $\angle -69,12^\circ$	0,00	Memenuhi Standar

Tabel 3 menampilkan data hasil pengukuran THDi dari orde 1 sampai orde 10 pada kondisi transformator berbeban menggunakan penyearah setengah gelombang. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (4), didapat total THDi sebesar $79,35\%$, tidak memenuhi standar. Arus harmonisa yang dominan, pada orde 2 dengan THDi $77,78\%$, orde 3 dengan THDi $11,11\%$, dan orde 4 dengan

THDi $11,11\%$, tidak memenuhi standar.

Tabel 3 THDi Orde 1-10 Hasil Pengukuran Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang

Orde	Arus Pengukuran (A)	THDi Orde Ke-n (%)	Standar IEEE 519-2014 (4,0%)
1	0,09 $\angle -140,10^\circ$	100	-
2	0,07 $\angle 79,73^\circ$	77,78	Tidak Memenuhi Standar
3	0,01 $\angle -84,66^\circ$	11,11	Tidak Memenuhi Standar
4	0,01 $\angle 38,81^\circ$	11,11	Tidak Memenuhi Standar
5	0,00 $\angle -78,85^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
6	0,00 $\angle -76,90^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
7	0,00 $\angle -74,95^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
8	0,00 $\angle -73,00^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
9	0,00 $\angle -71,05^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
10	0,00 $\angle -69,10^\circ$	0,00	Memenuhi Standar

Tabel 4 menampilkan data hasil pengukuran THDi dari orde 1 sampai orde 10 pada transformator berbeban menggunakan penyearah gelombang penuh. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (4), didapat total THDi $46,40\%$, tidak memenuhi standar. Arus harmonisa yang dominan pada orde 3 dengan THDi $44,19\%$, dan orde 5 dengan THDi $13,95\%$, tidak memenuhi standar.

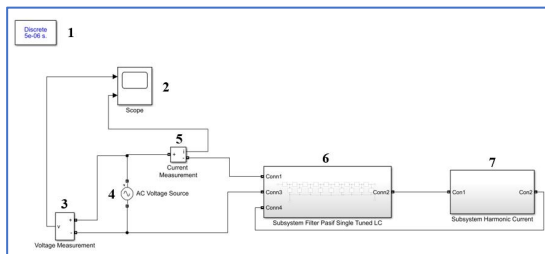
Tabel 4 THDi Orde 1-10 Hasil Pengukuran Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Gelombang Penuh

Orde	Arus Pengukuran (A)	THDi Orde Ke-n (%)	Standar IEEE 519-2014 (4,0%)
1	0,043 $\angle 32,91^\circ$	100	-
2	0,000 $\angle -84,72^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
3	0,019 $\angle 142,45^\circ$	44,19	Tidak Memenuhi Standar
4	0,000 $\angle -80,82^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
5	0,006 $\angle 11,15^\circ$	13,95	Tidak Memenuhi Standar
6	0,000 $\angle -76,91^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
7	0,000 $\angle -76,16^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
8	0,000 $\angle -73,01^\circ$	0,00	Memenuhi Standar
9	0,001 $\angle 148,55^\circ$	2,33	Memenuhi Standar
10	0,000 $\angle -69,11^\circ$	0,00	Memenuhi Standar

Sedangkan THDv dari orde 1 sampai 10 pada transformator secara keseluruhan, memenuhi standar.

4.4 Rangkaian Simulasi MATLAB Filter Pasif *Single Tuned* LC

Gambar 11 menunjukkan simulasi rangkaian menggunakan MATLAB setelah filter pasif *single tuned* LC dipasang.

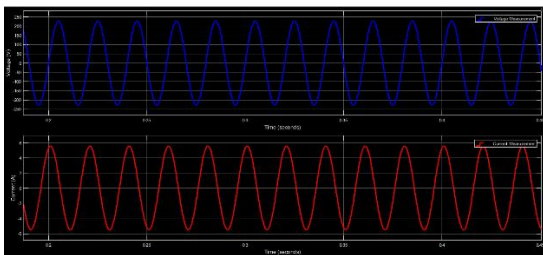


Gambar 11 Simulasi Rangkaian Menggunakan MATLAB Setelah Filter Pasif *Single Tuned* LC Dipasang

Keterangan:

- 1 : powergui
- 2 : scope
- 3 : *voltage measurement*
- 4 : *AC voltage source*
- 5 : *current measurement*
- 6 : *subsystem* filter pasif *single tuned* LC
- 7 : *subsystem* sumber harmonisa arus

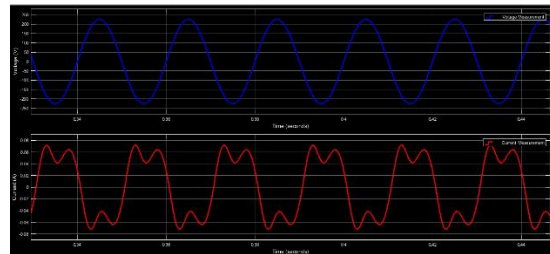
Pada gambar 12 terlihat bentuk gelombang tegangan dan arus setelah filter pasif *single tuned* LC dipasang pada transformator berbeban dengan penyearah setengah gelombang pada sisi primer.



Gambar 12 Bentuk Gelombang Tegangan (Biru) dan Arus (Merah) Setelah Filter

Pasif *Single Tuned* LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang

Gambar 13 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan dan arus setelah filter pasif *single tuned* LC dipasang pada kondisi transformator berbeban dengan penyearah gelombang penuh pada sisi primer.



Gambar 13 Bentuk Gelombang Tegangan (Biru) dan Arus (Merah) Setelah Filter Pasif *Single Tuned* LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Gelombang Penuh

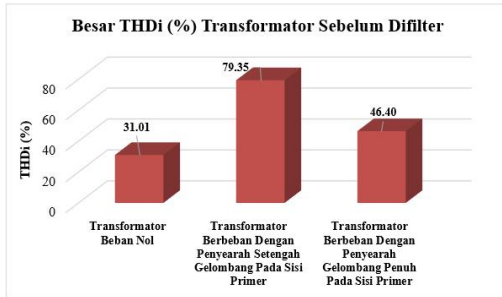
4.5 Analisa Terhadap Hasil Pengolahan Data

Pada bagian ini dilakukan pembahasan terhadap hasil pengolahan data pada tiga kondisi transformator dan juga hasil dari simulasi penggunaan filter pasif *single tuned* LC menggunakan MATLAB pada kondisi transformator berbeban.

1. Berdasarkan gambar 14, dapat dilihat besar THDi sebelum difilter pada tiga kondisi transformator sebagai berikut:

- Transformator beban nol, THDi 31,01%, tidak memenuhi standar.
- Transformator berbeban dengan penyearah setengah gelombang pada sisi primer, THDi sebesar 79,35%, tidak memenuhi standar.
- Transformator berbeban dengan penyearah gelombang penuh pada sisi primer, THDi sebesar 46,40%, tidak memenuhi standar.

Tingkat THDi pada kondisi transformator berbeban dengan penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh, tidak memenuhi standar. Namun, pada kondisi transformator beban nol, nilai THDi sebesar 31,01% kemungkinan disebabkan oleh adanya pemakaian indikator LED pada *power supply* unit.



Gambar 14 Besarnya THDi Pada Tiga Kondisi Transformator Sebelum Difilter

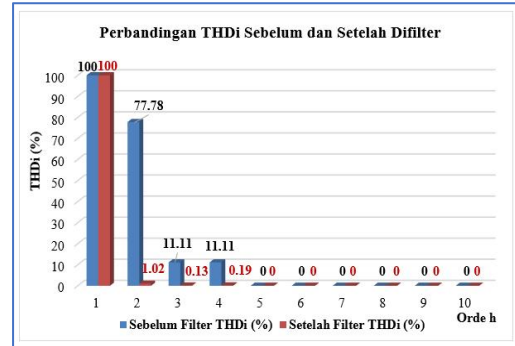
2. Tabel 5, memperlihatkan hasil simulasi filter pada transformator berbeban dengan penyearah setengah gelombang. Harmonisa arus untuk orde 2, orde 3, dan orde 4 mengalami penurunan THDi dan memenuhi standar.

Tabel 5 Perbandingan Nilai THDi Sebelum dan Setelah Filter Pasif Single Tuned LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang

Orde	Sebelum Filter THDi (%)	Setelah Filter THDi (%)	Standar IEEE 519-2014
2	77,78	1,02	Memenuhi Standar
3	11,11	0,13	Memenuhi Standar
4	11,11	0,19	Memenuhi Standar

Gambar 15 memperlihatkan penurunan THDi pada kondisi transformator berbeban dengan penyearah setengah gelombang.

Terjadi penurunan THDi setelah dilengkapi dengan filter berkisar 0% hingga 1,02% dan memenuhi standar.



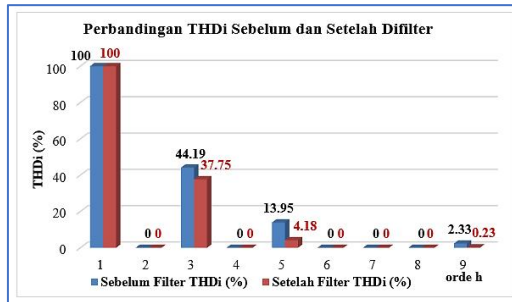
Gambar 15 Perbandingan THDi Sebelum dan Setelah Filter Pasif Single Tuned LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang

3. Tabel 6 memperlihatkan hasil simulasi filter pada transformator berbeban dengan penyearah gelombang penuh. Harmonisa arus untuk orde 3 dan orde 5 mengalami penurunan THDi, namun tidak memenuhi standar.

Tabel 6 Perbandingan Nilai THDi Sebelum dan Setelah Filter Pasif Single Tuned LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Gelombang Penuh

Orde	Sebelum Filter THDi (%)	Setelah Filter THDi (%)	Standar IEEE 519-2014
3	44,19	37,75	Tidak Memenuhi Standar
5	13,95	4,18	Tidak Memenuhi Standar

Gambar 16 memperlihatkan penurunan THDi setelah difilter berkisar 0% hingga 37,75%, namun tidak memenuhi standar.



Gambar 16 Perbandingan THDi Sebelum dan Setelah Filter Pasif *Single Tuned* LC Dipasang Pada Transformator Berbeban Dengan Penyearah Setengah Gelombang

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan dari hasil pengukuran, perhitungan, dan simulasi MATLAB/Simulink dalam transformator satu fasa yang dibebani MAS:

1. Berdasarkan hasil pengukuran langsung menggunakan alat ukur PQA, diperoleh THDi 31,01% pada transformator beban nol, pada transformator berbeban MAS dengan penyearah setengah gelombang, THDi sebesar 79,35%, dan pada kondisi transformator berbeban MAS dengan penyearah gelombang penuh, THDi sebesar 46,40% dan tidak memenuhi standar.
2. Hasil simulasi filter pasif *single tuned* LC menunjukkan bahwa, pada transformator berbeban MAS dengan penyearah setengah gelombang, sebelum difilter, THDi 79,35%, namun setelah difilter, THDi turun menjadi 1,04% dan memenuhi standar. Pada transformator berbeban MAS dengan penyearah gelombang penuh, sebelum difilter, THDi 46,40%, namun setelah difilter, THDi 37,98%, tidak memenuhi standar.

5.2 Saran

Disarankan untuk melakukan

penelitian harmonisa dan simulasi filter aktif, khususnya terhadap transformator berbeban MAS dengan penyearah gelombang penuh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Firdani, S. (2021). Simulasi Rugi-Rugi Daya Akibat *Total Harmonic Distortion* (THD) Terhadap Efisiensi Transformator Daya Di Gardu Induk 150 kV Blora. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [2] Sukerayasa, I. W., & Giriantari, I, A, D. (2019). Analisa Polusi Harmonik Pada Sistem Tegangan Rendah. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro* (Vol. 18, No.1), 1693-2951, 2503-2372. doi:https://doi.org/10.24843/MITE.2019.v18i01.P10.
- [3] Asmara, R., Lomi, A., & Sulistiawati, I. B. (2019). Implementasi Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonisa Pada Motor Induksi Tiga Fasa Di PT. BBE (Bukit Baiduri Energi). *Seminar Hasil Elektro S1 ITN Malang* (pp. 1–7).
- [4] Gunawan, D. C., & Jamaaluddin. (2020). *Transformator Listrik*. Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.
- [5] Utomo, H. B., & Rafita, M. (2021). Perancangan Filter Pasif Untuk Mengurangi Kandungan Arus Harmonisa Pada Transformator Daya Berbasis Simulink. *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar* (pp. 314-319).
- [6] Reza, M. S., & Hudaya, C. (2021). Analisis Pengaruh Harmonisa Pada Transformator Distribusi Di Hari Kerja Dan Hari Libur Pada Gedung Perkantoran. *Science and*

- Technology. Jurnal Tambora (Vol. 5, No. 1).
- [7] Saodah, S., Wiwit, I. M., Deni, A., Sodiq, D., & Puguh, B. (2021). Pengaruh Harmonisa Penggerak Kecepatan Variabel terhadap Kinerja Motor DC Fan *Test Set*. ELKOMIA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika (Vol. 9, No. 3, pp. 505-517). doi:<http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v9i3.505>.
- [8] Rosa, F. C. D. L. (2006). *Harmonics And Power Systems*. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC.
- [9] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2004). *Electrical Power Systems Quality* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [10] Heryana, N., Iskandar, H. R., Widodo, B., & Purba, R. (2019). *Compact Fluorescence Lamp Based on Power Electronics Technology : Its Advantages and Disadvantages*. JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa), (Vol. 4, No. 1, pp. 99–108). doi: 10.31544/jtera.v4.i1.2019.99-108.
- [11] Wakileh, G. J. (2001). *Power Systems Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design* (1st ed.). New York: Springer.
- [12] Morales, I. G. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 978-0-7381-9005-1. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [13] Zuhail. (1988). *Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya* (1st ed.). Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, Anggota IKAPI.
- [14] Silalahi, E. M. (2023). *Dasar Konversi Energi Listrik* (Mei ed.). Universitas Kristen Indonesia, Jakarta (BMP.UKI: EMS-02-DKEL-PSTE-IV-2021).
- [15] Sumanto. (1984). *Mesin Arus Searah* (1th ed.) Yogyakarta: ANDI OFFSET.
- [16] Bagia, I. N., & Parsa, I. M. (2018). *Motor-Motor Listrik* (1st ed.). Manesi, D (Ed.). CV. Rasi Terbit.
- [17] Rashid, M. H. (2007). *Power Electronics Handbook* (2nd ed.). Academic Press is an imprint of Elsevier.
- [18] Aini, Z., & Mar'i, A. (2021). *Desain Singel Tuned Filter Terhadap Harmonisa Pada Transformator Distribusi* (1st ed.). Pekan Baru: Al-Mujtahadah Press.
- [19] Suharsaputra, U. (2012). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan Tindakan* (1st ed.). Bandung: Refika Aditama.
- [20] Manualslib. *Quick Manual PQA Kyoritsu KEW 6315*. Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd, (pp. 19-44).
- [21] Standar Nasional Indonesia, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011),” *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2011, no. PUIL, pp. 1–133, 2011.