

**ANALISIS PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA
TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI
HARMONISA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ANDRE PRASETYA
NIM. 135060300111032**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017



repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA
TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI
HARMONISA

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ANDRE PRASETYA
NIM. 135060300111032

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 31 Januari 2017

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Azis Muzlim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001





JUDUL SKRIPSI:

ANALISIS PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI HARMONISA

Nama Mahasiswa : Andre Prasetya
NIM : 135060300111032
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Ir. Hery Purnomo, M.T.

Anggota : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Penguji II : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

Dosen Penguji III : Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T.

Tanggal Ujian : 27 Januari 2017
SK Penguji : 173/UN10.F07/SK/2017



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayahanda Rustam dan Ibunda Macik Mujayana tercinta*





PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 31 Januari 2017
Mahasiswa,

ANDRE PRASETYA
135060300111032





RINGKASAN

Andre Prasetya, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2017, **Analisis Penggunaan Belitan Tersier pada Transformator Hubungan Y-Y dalam Mengurangi Harmonisa**. Dosen Pembimbing: Hery Purnomo, dan Unggul Wibawa.

Transformator merupakan peralatan listrik yang sangat berpengaruh besar pada sistem tenaga listrik. Transformator dirancang untuk menyalurkan energi dengan rugi-rugi sekecil mungkin. Namun, apabila pada sistem tenaga listrik terdapat harmonisa, maka akan sangat berdampak buruk bagi transformator dan alat-alat listrik lainnya. Pada Gardu Induk, biasanya digunakan transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung Δ . Belitan tersebut digunakan dengan maksud agar harmonisa pada sistem berkurang. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh belitan tersier dalam mengurangi harmonisa baik pada beban seimbang maupun beban tidak seimbang.

Pada pengujian yang dilakukan di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya digunakan motor induksi tiga fasa dan dikopel dengan generator DC *shunt* sebagai pembebanan seimbang, dan digunakan lampu pijar serta lampu LED yang tersusun paralel dan dihubung Y sebagai pembebanan tidak seimbang. Dari hasil pengujian dan analisis didapatkan bahwa transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung Δ dapat memperbaiki tegangan tidak seimbang dan mengurangi harmonisa. Untuk keadaan beban seimbang tegangan harmonisa berkurang hingga 4,87 V dan arus harmonisa hingga 0,29 mA, sedangkan pada keadaan beban tidak seimbang tegangan harmonisa berkurang hingga 1,69 V dan arus harmonisa hingga 0,16 mA.

Kata Kunci: transformator tiga belitan, belitan tersier, harmonisa



SUMMARY

Andre Prasetya, Department of Electrical Engginering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, January 2017, *Analysis of The Use of Tertiary Winding on Transformer Y-Y in Reducing Harmonics*, Supervisor: Hery Purnomo, dan Unggul Wibawa.

The transformer is an electrical equipment that is very important on the electricity system. The transformer is designed to distribute the energy with the possible small losses. However, if the harmonic is excited in the power system, it will impact to the transformer operation and other electrical equipments. At the substation, usually used Y-Y transformer with the addition of tertiary winding Δ -connected. Tertiary winding is used to reduced harmonic in the system. This research aimed to find out on how much the influence of tertiary winding in harmonic reduction in both balanced load and unbalanced load.

Based on a research which have been experimented in the Electrical Machine Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, the research used three-phased induction motor and it coupled with a DC shunt generator as balancing load. As unbalanced load, it using incandescent bulbs and LED lights which connected parallely in Y-form. According to the research and analysis, it was resulted that the Y-Y transformer with the addition of tertiary windings Δ -connected can repair unbalanced voltage and reduce harmonics. In balanced load, the harmonic voltage decreases to 4.87 V and its harmonic current decreases to 0.29 mA, meanwhile in unbalanced load, the harmonic voltage decreases to 1.69 V and its harmonic current to 0.16 mA.

Keywords: three windings transformer, tertiary winding, harmonics.



PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya bagi Allah Subhanahu Wa Taala, Rabb alam semesta. Dialah Allah, Tuhan Yang Maha Satu, Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Dialah Sebaik baik Penolong dan Sebaik baik Pelindung. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Rasulullah Shallallahu Alaihi Wa Salam, Sang pembawa kabar gembira dan sebaikbaik suri tauladan bagi yang mengharap Rahmat dan Hidayah-Nya.

Sungguh hanya melalui Pertolongan dan Perlindungan Allah SWT semata sehingga dapat terselesaikan skripsi ini. Dengan seizin Allah SWT, di kesempatan yang baik ini dihaturkan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya atas bantuan sehingga terselesainya skripsi ini kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., S.T., Msc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran dan motivasinya.
4. Bapak Hery Purnomo, Ir., M.T. selaku dosen pembimbing dan Ka. Lab. Mesin Elektrik yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
5. Bapak Unggul Wibawa, Ir., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
6. Erfan Achmad Dahlan, Ir., M.T. selaku dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan, nasehat dan motivasi yang telah diberikan.
7. Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala alat serta sarana dan prasarana yang dimanfaatkan dalam melakukan penelitian ini.
8. Keluarga tercinta, kedua orang tua, Mbak Lia, Mbak Inta, Mas Edi, dan Novalina yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir.
9. Keluarga besar Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 2012, 2013 dan 2014 yang telah memberikan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Keluarga besar angkatan 2013 “SPECTRUM”, atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.

11. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Sekiranya Allah SWT mencatat amal baik kepada semua pihak yang turut membantu menyelesaikan skripsi ini. Akhirnya, dapat di sadari bersama bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Allahumma Amîn.

Malang, 31 Januari 2017

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Transformator	5
2.2 Transformator dalam Sistem Tiga Fasa	5
2.2.1 Transformator Hubungan Δ - Δ	6
2.2.2 Transformator Hubungan Δ -Y	6
2.2.3 Transformator Hubungan Y- Δ	7
2.2.4 Transformator Hubungan Y-Y	7
2.3 Ketidakseimbangan Beban pada Transformator	9
2.4 Jenis Beban Listrik	10
2.4.1 Beban Listrik Linier	10
2.4.2 Beban Listrik Nonlinier	10
2.5 Harmonisa	10
2.6 Analisis Kandungan Harmonisa	12
2.7 Standar Harmonisa	13
2.8 Dampak Harmonisa	14
BAB III METODE PENELITIAN.....	15
3.1 Studi Literatur	16
3.2 Perencanaan Pengujian	16
3.2.1 Penyediaan Alat Pengujian	16
3.2.2 Penyediaan Alat Ukur dan Alat Bantu Lainnya	18
3.2.3 Rangkaian Pengujian	18
3.3 Pengujian.....	19
3.4 Pengambilan Data	20
3.4.1 Data Primer	20
3.4.2 Data Sekunder.....	20

3.5 Perhitungan dan Analisis Data.....	20
3.6 Kesimpulan dan Saran	21
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS	23
4.1 Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang	23
4.1.1 Peralatan	23
4.1.2 Prosedur Pengujian	24
4.1.3 Data Hasil Pengujian	25
4.1.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total	28
4.2 Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang....	30
4.2.1 Peralatan	30
4.2.2 Prosedur Pengujian	30
4.2.3 Data Hasil Pengujian	31
4.2.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total	34
4.3 Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa.....	36
4.4 Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang 39	
4.4.1 Peralatan	39
4.4.2 Prosedur Pengujian	39
4.4.3 Data Hasil Pengujian	40
4.4.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total	41
4.5 Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang 42	
4.5.1 Peralatan	42
4.5.2 Prosedur Pengujian	42
4.5.3 Data Hasil Pengujian	43
4.5.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total	44
4.6 Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN.....	53

DAFTAR GAMBAR

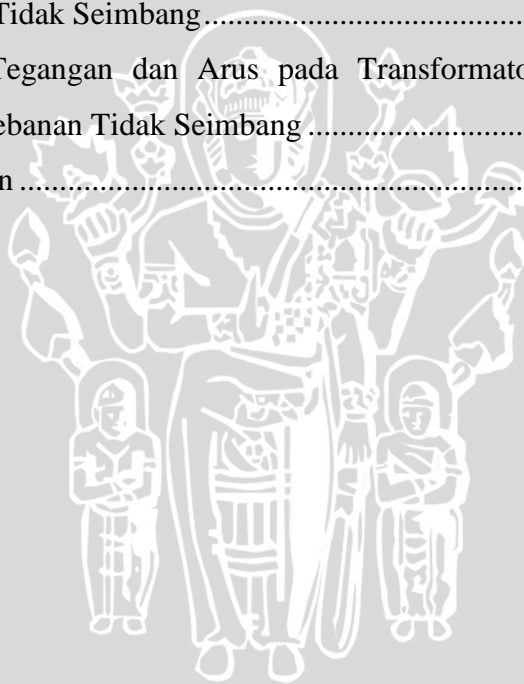
No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Transformator Hubungan Δ - Δ	6
Gambar 2.2	Transformator Hubungan Δ -Y	7
Gambar 2.3	Transformator Hubungan Y- Δ	7
Gambar 2.4	Transformator Hubungan Y-Y.....	8
Gambar 2.5	Vektor Diagram Arus.....	9
Gambar 2.6	Gelombang Fundamental, Harmonisa Kedua, dan Harmonisa Ketiga	11
Gambar 2.7	Hasil Penjumlahan Gelombang-gelombang Non Sinusoidal.....	12
Gambar 3.1	Diagram Alir Pengerjaan Penelitian	15
Gambar 3.2	Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang.....	19
Gambar 3.3	Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang.....	19
Gambar 3.4	Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	19
Gambar 3.5	Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	19
Gambar 4.1	Rangkaian Transformator Hubungan Y-Y.....	24
Gambar 4.2	Cara Menghubungkan Pilot <i>Power Monitoring Analyzer</i> PMAC760	25
Gambar 4.3	Tampilan pada Pilot <i>Power Monitoring Analyzer</i> PMAC 760.....	25
Gambar 4.4	Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban.....	27
Gambar 4.5	Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban.....	27
Gambar 4.6	Rangkaian Transformator Hubungan Y- Δ -Y.....	30
Gambar 4.7	Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban.....	33
Gambar 4.8	Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban.....	33
Gambar 4.9	Hubungan Tegangan Harmonisa Total terhadap Arus Beban	37
Gambar 4.10	Hubungan Arus Harmonisa Total terhadap Arus Beban	38
Gambar 4.11	Tegangan Harmonisa Total pada Setiap Fasa	46
Gambar 4.12	Arus Harmonisa Total pada Setiap Fasa.....	46

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Maksimum Distorsi Harmonisa Standar IEEE 519-1992.....	13
Tabel 2.2	Standar Distorsi Tegangan.....	13
Tabel 3.1	Peralatan Pengujian	17
Tabel 3.2	Alat Instrumentasi dan Alat Bantu Lainnya	18
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang	26
Tabel 4.2	Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang	29
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang	38
Tabel 4.4	Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang.....	35
Tabel 4.5	Perbandingan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dan Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang	37
Tabel 4.6	Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	40
Tabel 4.7	Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	42
Tabel 4.8	Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	43
Tabel 4.9	Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang.....	45
Tabel 4.10	Perbandingan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dan Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	46

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang	54
Lampiran 2.	Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang.....	59
Lampiran 3.	Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang.....	64
Lampiran 4.	Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang.....	69
Lampiran 5.	Gelombang Tegangan dan Arus pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang.....	74
Lampiran 6.	Gelombang Tegangan dan Arus pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang	75
Lampiran 7.	Foto Pengujian	76





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan tenaga listrik yang tersambung pada beban-beban non-linier akan menimbulkan arus / tegangan dengan besar frekuensinya kelipatan frekuensi fundamental. Sistem tenaga listrik di Indonesia dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 Hz. Frekuensi 50/60 Hz disebut dengan frekuensi fundamental dan kelipatannya disebut frekuensi harmonik atau harmonisa. Distorsi harmonisa sebenarnya adalah konsekuensi dari semakin banyaknya penggunaan beban-beban non-linier dengan daya kecil maupun besar (Esye, 2016: 1). Harmonisa yang ditimbulkan oleh pemakaian beban non-linier sangatlah berpengaruh terhadap sistem ketenagalistrikan terutama pada jaringan sistem 3 fasa.

Harmonisa dapat mempengaruhi komponen-komponen pada sistem distribusi, tidak terkecuali pada transformator. Transformator dirancang untuk memungkinkan penyaluran daya ke beban dengan rugi-rugi sekecil mungkin pada frekuensi dasar. Akan tetapi apabila terjadi distorsi harmonisa pada arus dan tegangannya maka menimbulkan rugi-rugi (panas) yang cukup signifikan. Meningkatnya rugi-rugi tersebut akibat adanya komponen-komponen arus harmonisa yang mengalir bersama arus beban sehingga terjadi peningkatan panas pada transformator. Pada transformator khususnya hubungan Y-Y terdapat permasalahan yang cukup serius, yaitu pada transformator hubungan ini timbul harmonisa dan ketika memikul beban tidak seimbang mengakibatkan tegangan fasanya menjadi sangat tidak seimbang (Chapman, 2005: 118) sehingga akan menimbulkan arus pada penghantar netral yang berakibat buruk bagi transformator.

Dalam praktiknya, transformator yang umum digunakan pada Gardu Induk (GI) adalah transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) guna mengurangi harmonisa. Mengingat sangat pentingnya hal itu, maka penulis mengangkat judul “Analisis Penggunaan Belitan Tersier pada Transformator Hubungan Y-Y dalam Mengurangi Harmonisa” untuk dilakukan suatu pengujian dan analisis yang memberikan hasil seberapa besar pengaruh belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah dijelaskan pada latar belakang, dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Seberapa besar kandungan harmonisa yang terjadi pada transformator hubungan Y-Y pada beban seimbang dan tidak seimbang.
2. Bagaimana pengaruh penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa pada beban seimbang dan tidak seimbang.

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini mencapai sasaran yang diharapkan, maka batasan masalah yang perlu diberikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi kasus dilakukan pada transformator 3 fasa, 3 belitan, 2 kVA, 50 Hz, tegangan primer (per fasa) : 220 V, arus primer : 5 A, tegangan sekunder (per fasa) : 67,5 V, arus sekunder : 5,3 A, tegangan tersier (per fasa) : 67,5 V, arus tersier : 5,3 A, di Laboratorium Mesin Elektrik Universitas Brawijaya.
2. Beban yang digunakan adalah motor induksi (untuk pembebanan seimbang), dan lampu pijar serta lampu LED (untuk pembebanan tidak seimbang).
3. Pengamatan dan pengambilan data harmonisa dilakukan dengan menggunakan alat ukur Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760.
4. Tidak membahas analisa harmonisa yang muncul pada transformator dengan menggunakan Deret Fourier secara terperinci.
5. Tidak membahas seberapa besar kerugian dari segi ekonomis.

1.4 Tujuan

Tujuan dari pembahasan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa baik pada keadaan beban seimbang maupun tidak seimbang.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui besar kandungan harmonisa pada transformator hubungan Y-Y dan pengaruhnya ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) dalam mengurangi harmonisa yang terjadi pada keadaan beban seimbang maupun tidak seimbang.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi pendahuluan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Berisi penjelasan tentang metode pengujian dan pengambilan data yang diperlukan dalam penyusunan penelitian ini.

BAB IV : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Berisi pembahasan mengenai analisis harmonisa yang terjadi pada transformator hubungan Y-Y dan pengaruhnya ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada keadaan beban seimbang dan tidak seimbang dalam mengurangi harmonisa dengan memperhatikan hasil penelitian dari data yang diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran dari analisis dalam penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang mampu mengubah maupun untuk menyalurkan energi listrik arus bolak-balik dari satu atau lebih rangkaian listrik arus bolak-balik yang lain, melalui gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang dapat menaikkan/menurunkan tegangan/arus dengan frekuensi yang sama.

Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan andal merupakan salah satu alasan penting dalam pemakaiannya dalam penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik, karena arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Pada penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik terjadi kerugian sebesar $I^2 \cdot R$ watt. Kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan setinggi mungkin. Dengan demikian, maka saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi, dengan cara mempergunakan transformator untuk menaikkan tegangan listrik di pusat listrik dari tegangan generator yang berkisar antara 6 kV sampai 20 kV pada awal transmisi ke tegangan saluran transmisi antara 100 kV sampai 1000 kV, kemudian menurunkannya lagi pada akhir saluran ke tegangan yang lebih rendah. (Kadir, 1989: 1)

2.2 Transformator dalam Sistem Tiga Fasa

Pada sistem tiga fasa, penaikan dan penurunan tegangan dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu: (Sudirham, 2010: 44-47)

1. menggunakan satu unit transformator tiga fasa,
2. menggunakan tiga unit transformator satu fasa.

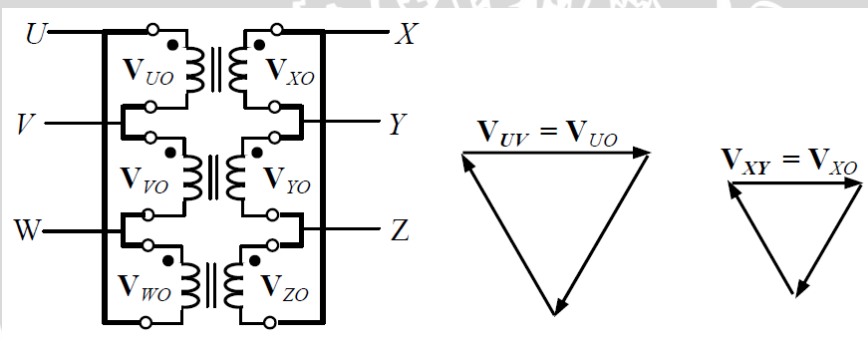
Transformator tiga fasa mempunyai inti dengan tiga kaki dan setiap kaki mendukung belitan primer dan sekunder. Untuk penyaluran daya yang sama, penggunaan satu unit transformator tiga fasa akan lebih ringan, lebih murah, dan lebih efisien dibandingkan dengan tiga unit transformator satu fasa. Akan tetapi penggunaan tiga unit transformator satu fasa juga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan satu unit transformator tiga fasa. Pemilihan cara mana yang lebih baik, tergantung dari berbagai pertimbangan keadaan.

Berikut ini merupakan hubungan primer-sekunder transformator, dengan melihat pelayanan sistem tiga fasa melalui tiga unit transformator satu fasa.

2.2.1 Transformator Hubungan Δ - Δ

Pada waktu menghubungkan tiga transformator satu fasa untuk melayani sistem tiga fasa, hubungan sekunder harus diperhatikan agar sistem tetap seimbang. Fasa primer disebut dengan fasa U - V - W sedangkan fasa sekunder disebut fasa X - Y - Z . Fasor tegangan fasa primer kita sebut V_{UO} , V_{VO} , V_{WO} dengan nilai V_{FP} , dan tegangan fasa sekunder kita sebut V_{XO} , V_{YO} , V_{ZO} dengan nilai V_{FS} . Nilai tegangan saluran (tegangan fasa-fasa) primer dan sekunder kita sebut V_{LP} dan V_{LS} . Nilai arus saluran primer dan sekunder masing-masing disebut I_{LP} dan I_{LS} sedang nilai arus fasanya I_{FP} dan I_{FS} . Rasio tegangan fasa primer terhadap sekunder $V_{FP}/V_{FS}=a$. Dengan mengabaikan rugi-rugi untuk hubungan Δ - Δ maka diperoleh: (Sudirham, 2010:45)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a ; \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a} \quad (2-1)$$



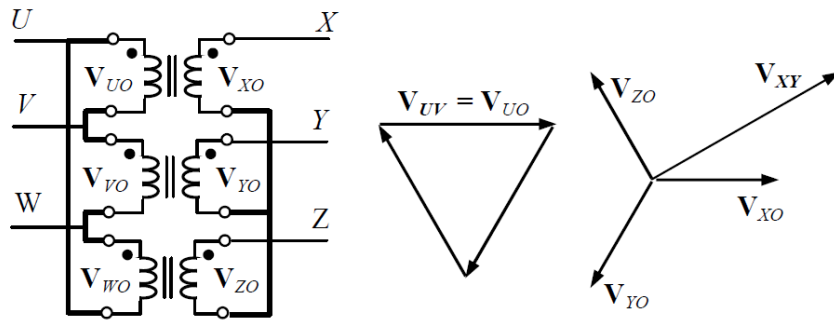
Gambar 2.1 Transformator Hubungan Δ - Δ
Sumber: Sudirham, 2010:45

2.2.2 Transformator Hubungan Δ - Y

Tegangan fasa-fasa primer sama dengan tegangan fasa primer, sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Dengan mengabaikan rugi-rugi diperoleh: (Sudirham, 2010:45)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}} ; \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}\sqrt{3}}{I_{FS}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \quad (2-2)$$

Fasor tegangan fasa-fasa sekunder mendahului primer sebesar 30° .



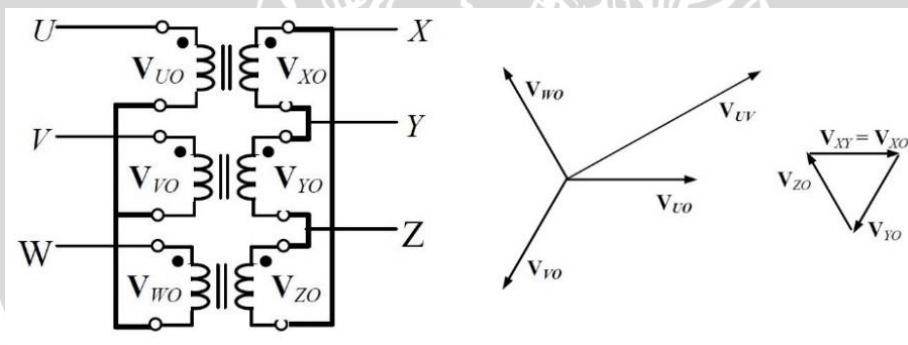
Gambar 2.2 Transformator Hubungan Δ-Y
 Sumber: Sudirham, 2010:45

2.2.3 Transformator Hubungan Y-Δ

Tegangan fasa-fasa pimer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , sedangkan tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan tegangan fasa sekunder. Dengan mengabaikan rugi-rugi diperoleh: (Sudirham, 2010:47)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}} = a\sqrt{3}; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}\sqrt{3}} = \frac{1}{a\sqrt{3}} \quad (2-4)$$

Fasor tegangan fasa-fasa primer mendahului sekunder sebesar 30° .



Gambar 2.3 Transformator Hubungan Y-Δ
 Sumber: Sudirham, 2010:47

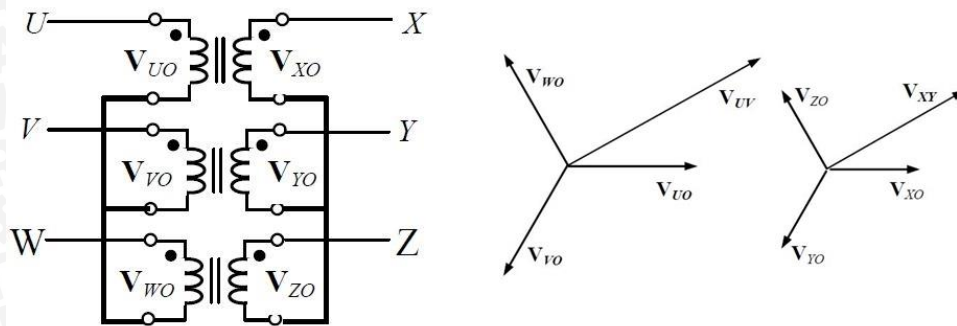
2.2.4 Transformator Hubungan Y-Y

Tegangan fasa-fasa pimer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Perbandingan tegangan fasa-fasa primer dan sekunder adalah (Sudirham, 2010:46)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}\sqrt{3}} = a; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}} = \frac{1}{a} \quad (2-3)$$



Antara fasor tegangan fasa-fasa primer dan sekunder tidak terdapat perbedaan sudut fasa.



Gambar 2.4 Transformator Hubungan Y-Y
Sumber: Sudirham, 2010:46

Hubungan Y-Y mempunyai dua permasalahan serius, yaitu: (Chapman, 2005: 118-120)

1. Jika beban pada transformator tidak seimbang, akan mengakibatkan tegangan fasa pada transformator bisa menjadi sangat tidak seimbang.
2. Tegangan harmonisa ketiga bisa sangat besar.

Kedua permasalahan di atas dapat diselesaikan dengan salah satu cara berikut:

1. Mentanahkan netral dari transformator, terutama netral dari belitan primer. Cara ini memungkinkan penambahan komponen harmonisa ketiga untuk membuat aliran arus di netral bukan untuk memperbesar tegangan. Dengan adanya netral yang ditanahkan ini akan menyediakan jalur kembali untuk setiap arus tidak seimbang.
2. Menambahkan belitan tersier yang terhubung delta (Δ). Jika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan ke transformator, maka komponen tegangan harmonisa ketiga pada belitan tersier Δ akan bertambah, karena terdapat arus sirkulasi yang beredar dalam belitan. Cara ini menekan komponen tegangan harmonisa ketiga dengan cara yang sama seperti pentanahan netral pada transformator. Belitan tersier ini biasanya dipasang pada inti transformator dan juga bisa dihubungkan dengan beban.

Selain itu, Winders (2002) menambahkan bahwa, ketika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan maka belitan ini dapat menstabilkan tegangan, menyuplai arus harmonisa ketiga untuk magnetisasi pada inti transformator, menyaring harmonisa ketiga dari sistem, dan menyediakan *grounding bank* ketika belitan primer dan sekunder terhubung Y.

Transformator hubungan Y-Y sering dilengkapi dengan belitan tersier hubung delta (Δ) untuk beberapa alasan: (Kapp, 1955: 1)

1. Untuk memberikan terminal bantu pada beda tegangan antara tegangan primer dan tegangan sekunder dari transformator.
2. Untuk memungkinkan arus gangguan tanah mengalir sebagai maksud pengoperasian alat pelindung.
3. Untuk mencegah transformator dari tegangan frekuensi *triple* ke jaringan.
4. Untuk menjaga kenaikan tegangan pada setiap fasa dalam keadaan beban tidak seimbang.

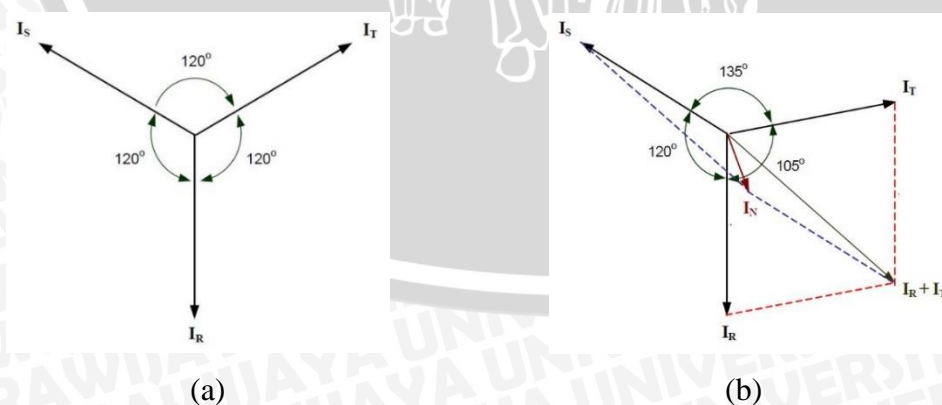
2.3 Ketidakseimbangan Beban pada Transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana: (Setiadji, 2006:69)

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu:

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.5 Vektor Diagram Arus
Sumber: Setiadji, 2006:69

Gambar 2.5(a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar 2.5(b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.4 Jenis Beban Listrik

Di dalam sistem tenaga listrik dikenal 2 (dua) jenis beban listrik, yaitu beban listrik linier dan beban listrik nonlinier.

2.4.1 Beban Listrik Linier

Beban listrik linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus. Beban linier merupakan beban yang mengeluarkan bentuk gelombang yang berbentuk linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan. (Dugan, 2003:184)

Pada beban linier ini, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangan yang ditimbulkannya. Bila gelombang tegangan berbentuk sinusoidal, bentuk gelombang arus juga membentuk sinusoidal. Contoh beban listrik linier adalah pemanasan resistif, lampu pijar, dan lain-lain.

2.4.2 Beban Listrik Nonlinier

Beban listrik nonlinier adalah beban yang mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus, sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Beban nonlinier inilah yang menimbulkan atau menghasilkan harmonisa (Dugan, 2003:189). Contoh beban listrik nonlinier adalah komputer, *Programmable Logic Control* (PLC), *Variable Speed Drive* (VSD), *Pulse Width Modulation* (PWM), peralatan tanur induksi (*induction furnace*), tanur busur listrik (*arc furnace*), konverter, *ballast* elektronik untuk lampu neon, las listrik, dan lain-lain.

2.5 Harmonisa

Pada dasarnya, gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dan didistribusikan dari sumber ke beban berupa gelombang sinusoidal murni. Akan tetapi, pada proses transmisi dan distribusi ini terjadi berbagai macam gangguan sehingga bentuk gelombang

tidak lagi sinusoidal murni. Salah satu fenomena penyimpangan bentuk gelombang sinusoidal ini adalah distorsi harmonik (Syahwil, 2010:2). Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan yang dapat menyebabkan peningkatan susut energi yaitu energi yang hilang atau tidak dapat dimanfaatkan, yang secara alamiah berubah menjadi panas (Cahyani, 2014) seperti membuat kabel, transformator, dan motor listrik menjadi panas. Gelombang ini terbentuk dari kelipatan frekuensi fundamentalnya (50 Hz), misalnya: 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 350 Hz, dan seterusnya. Frekuensi dari gelombang-gelombang tersebut merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi fundamental yang dapat ditulis dalam persamaan berikut : (Sankaran, 2002:83)

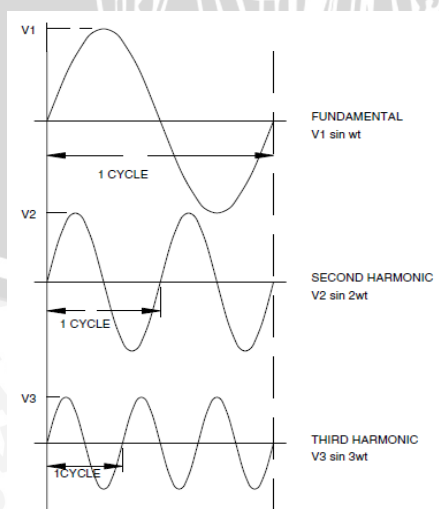
$$f_h = h \cdot f_d \quad (2-5)$$

dengan : f_h = frekuensi harmonisa (Hz)

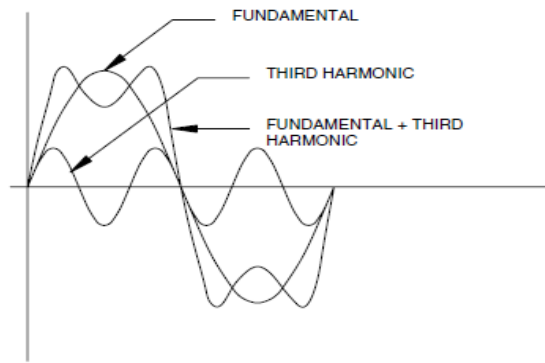
h = orde harmonisa (1,2,3,...)

f_d = frekuensi fundamental (Hz)

Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni/aslinya yaitu gelombang dengan frekuensi 50 Hz, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya. Bentuk gelombang dari gelombang fundamental adalah gelombang sinusoidal. Menurut, ahli matematika Jean Baptiste Fourier, gelombang yang tidak sinusoidal merupakan penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal dengan frekuensi kelipatan frekuensi gelombang fundamental.



Gambar 2.6 Gelombang Fundamental, Harmonisa Kedua, dan Harmonisa Ketiga
Sumber: Sankaran, 2002:83



Gambar 2.7 Hasil Penjumlahan Gelombang-gelombang Non Sinusoidal
Sumber: Sankaran, 2002:84

2.6 Analisis Kandungan Harmonisa

Distorsi harmonisa yang membentuk suatu bentuk distorsi mutu dari arus, tegangan, dan daya jaringan adalah besaran variabel yang berubah-ubah. Besaran distorsi tersebut dapat dinyatakan dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang digunakan sebagai ukuran untuk melihat berapa besar pengaruh keseluruhan adanya harmonisa terhadap sinyal sinus (Sugiarto, 2012:81). Pengaruh keseluruhan harmonisa diperbandingkan terhadap komponen fundamental, karena komponen fundamentalah yang memberikan transfer energi nyata.

Untuk tegangan non sinus, THD didefinisikan sebagai berikut: (Arrillaga, 2003:11)

$$THDv = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2-6)$$

V_{rms} dapat dinyatakan dengan identitas parseval $V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2-7)$$

Dimana:

V_h = tegangan rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n

V_1 = tegangan rms fundamental

N = harmonisa maksimum

h = orde harmonisa

Untuk arus nonsinus, THD didefinisikan sebagai berikut:

$$THDi = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2-8)$$

I_{rms} dapat dinyatakan dengan identitas parseval $I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_R} \times 100\% \quad (2-9)$$

Dimana:

I_h = arus rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n

I_R = arus rms fundamental

N = harmonisa maksimum

h = orde harmonisa

2.7 Standar Harmonisa

Karena begitu besar dan bervariasi dampak harmonisa pada peralatan dan sistem secara teknis dan ekonomis maka diperlukan standarisasi harmonisa. Standar yang mengatur distorsi harmonisa ini adalah standar IEEE 512-1992, standar ini mengatur batasan harmonisa yang diijinkan seperti terlihat dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Maksimum Distorsi Harmonisa Standar IEEE 519-1992

Maksimum Distorsi Harmonisa dalam % Arus Beban (I _L)						
Harmonisa Orde Ganjil Pada: 120 V ≤ V ≤ 69 kV						
I _{sc} /I _L	n<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	n≥35	THDi
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari batasan harmonisa orde ganjil diatas

Sumber : Kusko, 2007:79

Keterangan:

I_{sc} : Arus hubung singkat maksimum di Titik Sambung Bersama / PCC (*Point of Common Coupling*) atau pada Alat Pengukur dan Pembatas (APP).

I_L : Arus beban *demand* maksimum (komponen frekuensi fundamental) di PCC

Tabel 2.2 Standar Distorsi Tegangan

Distorsi Maksimum (%)	Tegangan		
	<69 kV	69-138 kV	>138 kV
<i>Individual harmonic</i>	3,0	1,5	1,0
<i>Total harmonic</i>	5,0	2,5	1,5

Sumber : Burke, 1994:284

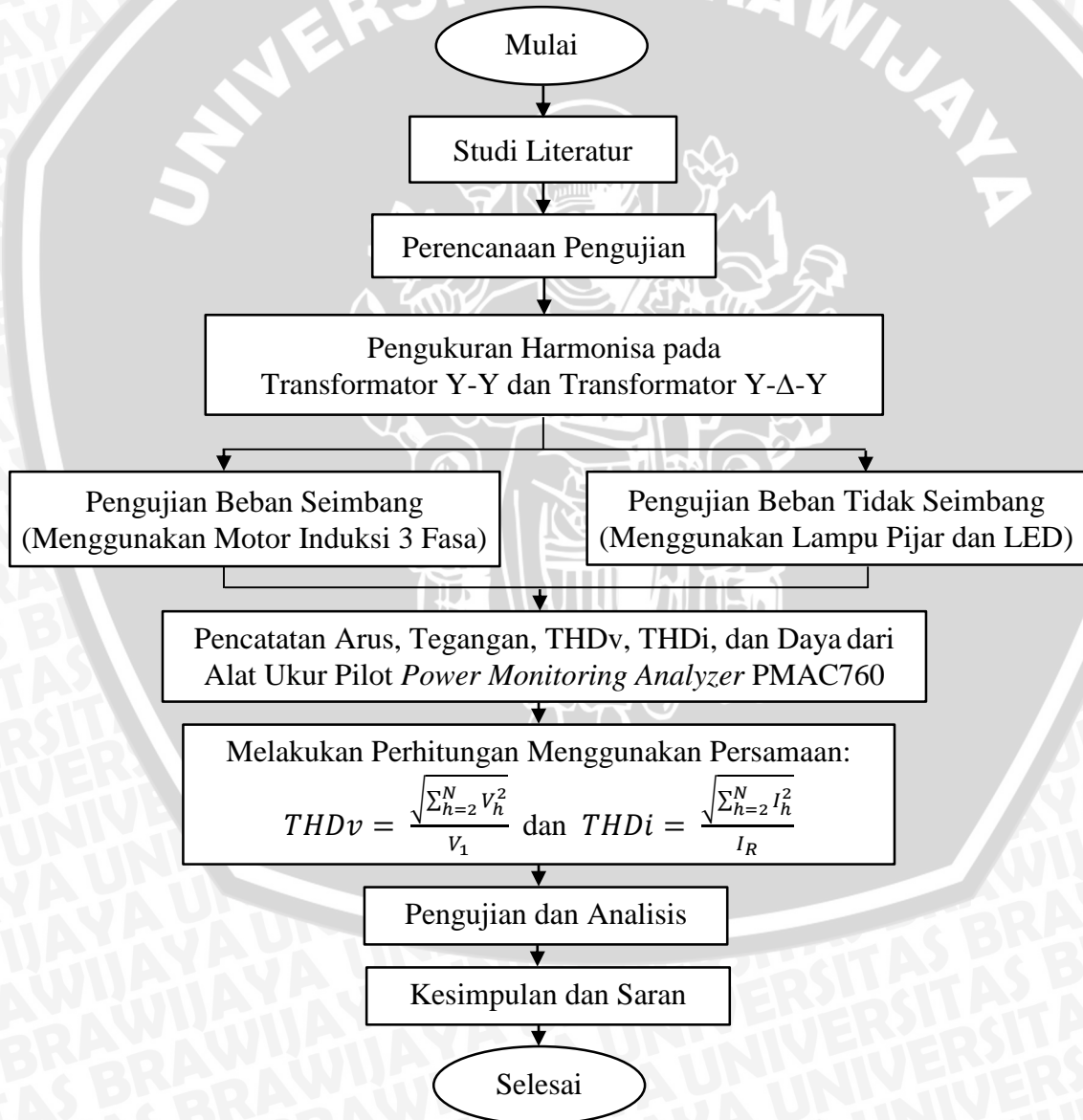
2.8 Dampak Harmonisa

Sinyal arus maupun tegangan yang mengandung harmonisa tidak lagi berbentuk sinusoida murni. Di dalam dunia industri, penggunaan beban nonlinier telah mengalami perkembangan yang luar biasa pesat. Hal tersebut memberikan kontribusi yang besar terhadap munculnya harmonisa. Semakin tinggi prosentase THD, maka semakin parah pula distorsi sinyalnya. Adapun dampak yang ditimbulkan dari harmonisa, yaitu: (Esye, 2016, 16)

- a. Meningkatnya aliran arus pada kawat netral bahkan dapat mencapai 1,7 hingga 2 kali lipat dari arus fasa.
- b. Motor dan transformator akan lebih cepat panas (*overheating*) sehingga mengurangi *lifetime* dari peralatan tersebut.
- c. Terjadi *overheating* pada belitan dan inti generator.
- d. Terjadi pemanasan pada kapasitor dan induktor yang dapat merusak komponen serta memungkinkan terjadinya aliran arus yang sangat besar akibat terjadinya resonansi paralel maupun tegangan lebih karena resonansi seri.
- e. Mengurangi efisiensi dari kerja transformator (*derating*).
- f. Munculnya noise berupa suara serta getaran-getaran mekanis (*bising*).
- g. Timbulnya *skin effect* pada kabel *power* yang mengakibatkan kabel menjadi *overheat*.
- h. *Circuit breaker* tidak bekerja dengan sebagaimana mestinya.
- i. Kacaunya peralatan yang menggunakan frekuensi 50 Hz sebagai referensi.
- j. Kerusakan pada peralatan elektronik.
- k. Terjadinya kesalahan dalam pengukuran akibat arus yang besar hingga putaran piringan kWh meter menjadi lebih cepat. Selain itu bisa menyebabkan terbakarnya kumparan arus akibat adanya aliran arus harmonisa yang sangat besar.

BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini disusun sebagai acuan alur kerangka berfikir dari awal penulisan, pengambilan data, dan analisis pengaruh penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa. Langkah-langkah dalam penelitian ini secara umum dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Penelitian
Sumber: Penulis

3.1 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan permasalahan yang akan dikaji dalam skripsi ini. Studi literatur ini dilakukan dengan mempelajari buku referensi, jurnal, skripsi, *web browsing* dan forum-forum resmi yang menunjang dalam penyusunan skripsi, yaitu:

1. Transformator 3 Fasa
2. Jenis Beban Listrik
 - a. Beban Listrik Linier
 - b. Beban Listrik Nonlinier
3. Ketidakseimbangan Beban pada Transformator
4. Harmonisa
 - a. Ukuran Harmonisa
 - b. Standar Harmonisa







3.2 Perencanaan Pengujian

Sebelum dilakukan pengujian, perlu adanya perencanaan yang meliputi penyediaan, persiapan, dan pengecekan pada alat pengujian serta alat instrumentasi dengan melakukan pengecekan dan kalibrasi terhadap alat ukur. Hal tersebut harus dilakukan agar dalam pengambilan data akurat dan mengurangi kegagalan, sehingga dalam pengujian ini berjalan dengan baik.

3.2.1 Penyediaan Alat Pengujian

Dalam pengujian dan pengambilan data akan dilakukan di Laboratorium Mesin Elektrik, Universitas Brawijaya. Pengujian yang akan dilakukan yaitu pengukuran terhadap kandungan harmonisa pada transformator tiga fasa hubungan Y-Y dan pengaruhnya ketika dilakukan penambahan beilatan tersier yang terhubung delta (Δ) dalam mengurangi harmonisa. Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan seimbang maupun tidak seimbang pada sisi sekunder transformator. Berikut merupakan alat-alat pengujian yang dibutuhkan dalam penelitian ini:





Tabel 3.1 Peralatan Pengujian

No.	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1	Transformator 3 Fasa	2 kVA 67,5/220V 5,3/5 A 50 Hz 3 belitan	1	
2	Motor Induksi 3 Fasa	370 W Δ/Y 380/660 V 1,05 A 50 Hz	1	
3	Beban Mekanik	Generator DC <i>Shunt</i> 200 W 220 V 2,2 A 2000 rpm	1	
4	Tahanan Geser	60 Ω 5 A	2	
5	Lampu Pijar	100 W 220 V	11	
6	Lampu LED	15 W 170-250 V 50-60 Hz	3	

3.2.2 Penyediaan Alat Ukur dan Alat Bantu Lainnya

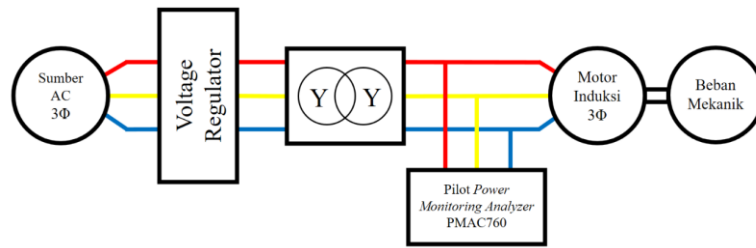
Peralatan instrumentasi dan peralatan tambahan yang dibutuhkan pada saat pengambilan data adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Alat Instrumentasi dan Alat Bantu Lainnya

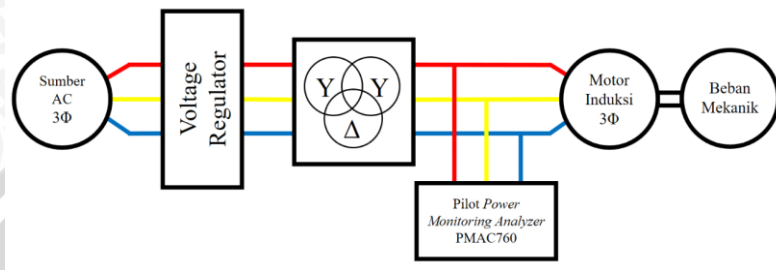
No.	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1	<i>Power Monitoring Analyzer</i>	Pilot PMAC760 $I_{\max} = 5 \text{ A}$	1	
2	Pengatur Tegangan 3 Fasa	9 kVA 12 A 50 Hz	1	
3	Pengatur Tegangan DC	2 kVA 250 V	1	
6	Kabel Penghubung		Secukupnya	

3.2.3 Rangkaian Pengujian

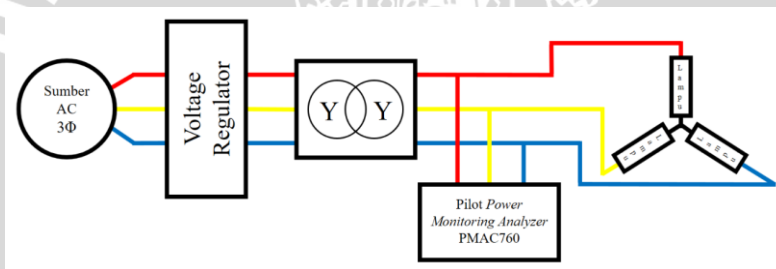
Rangkaian pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebanyak empat kali, yaitu pengujian transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang, pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan seimbang, pengujian transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang, dan pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang. Untuk lebih jelasnya ditunjukkan pada gambar berikut:



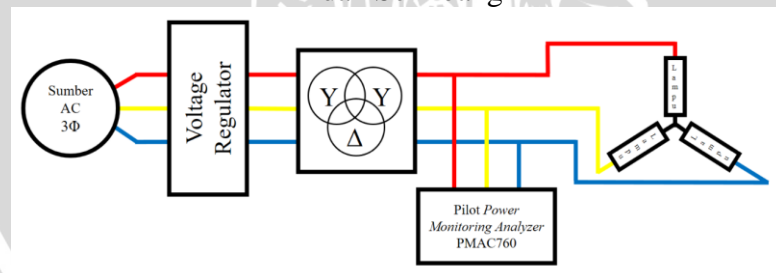
Gambar 3.2 Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang



Gambar 3.3 Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Δ-Y dengan Pembebanan Seimbang



Gambar 3.4 Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang



Gambar 3.5 Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Δ-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

3.3 Pengujian

Pada penelitian ini digunakan motor induksi 3 fasa dan lampu (pijar dan LED) sebagai beban yang akan dihubungkan langsung ke sisi sekunder transformator. Motor induksi 3 fasa akan digunakan sebagai pembebanan seimbang yang kemudian dibebani oleh beban mekanik berupa generator agar dapat mengatur arus dari motor induksi 3 fasa. Pengaturan arus beban tersebut dimaksudkan sebagai variabel untuk mengetahui pengaruhnya terhadap

harmonisa yang terjadi pada transformator. Arus beban akan diatur mulai dari kecil hingga mendekati nominal. Sedangkan lampu (pijar dan LED) akan digunakan untuk pembebanan tidak seimbang dengan cara memberikan besar daya yang berbeda pada setiap fasa.. Dari pengujian tersebut akan diukur kandungan harmonisa yang timbul dengan menggunakan alat ukur *Pilot Power Monitoring Analyzer PMAC760*.

3.4 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian ini. Data-data yang dikumpulkan berupa data primer dan data sekunder.

3.4.1 Data Primer

Data primer adalah data yang didapatkan dari hasil penelitian. Data primer didapatkan dari hasil pengukuran dan pengujian dengan cara pengukuran kandungan harmonisa pada transformator yang dibebani dengan motor induksi, dan lampu (pijar dan LED) dilakukan dengan menggunakan alat ukur *Pilot Power Monitoring Analyzer PMAC760*. Alat ukur ini digunakan untuk mengukur besarnya arus, tegangan, daya dan kandungan harmonisa.

3.4.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, web browsing dan forum-forum resmi yang menunjang dalam penyusunan penelitian. Data yang dibutuhkan antara lain:

1. Data transformator
2. Data beban
3. Standar harmonisa

3.5 Perhitungan dan Analisis Data

Dalam tahap ini, setelah pengujian dilakukan dan mendapatkan data yang diperlukan untuk mengetahui pengaruh harmonisa, dilakukan perhitungan sesuai persamaan yang telah dicantumkan pada BAB II. Setelah perhitungan dilakukan, langkah selanjutnya adalah dilakukan analisis yang meliputi:

- a. Analisis distorsi tegangan dan distorsi arus (THD_v dan THD_i) pada transformator. Untuk menganalisis THD ini, dipakai standar IEEE 519 "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*"

- b. Analisis pengaruh penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa pada keadaan beban seimbang maupun tidak seimbang.

3.6 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan dan analisis serta saran-saran yang diberikan. Di akhir penelitian ini akan ditarik suatu kesimpulan dari semua proses analisis yang telah dilakukan, dan pemberian saran kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan penelitian ini. Saran-saran yang diberikan kepada pembaca meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian, atau hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi terkait penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa.





BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas tentang pengaruh penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa. Pengujian tersebut dilakukan di Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa baik pada keadaan beban seimbang maupun tidak seimbang.

Dalam pelaksanaannya, transformator dihubungkan Y-Y kemudian dibebani oleh motor induksi dan lampu (pijar dan LED). Motor induksi akan digunakan sebagai pembebanan seimbang sedangkan lampu sebagai pembebanan tidak seimbang. Untuk pembebanan seimbang digunakan arus setiap fasanya sama besar yaitu mulai dari 0,8 sampai dengan 1 A dengan selisih 0,05 A setiap tingkatannya. Sedangkan untuk pembebanan tidak seimbang digunakan arus setiap fasanya tidak seimbang dimana pada fasa R dan S masing-masing dibebani oleh 500 W lampu pijar dan 15 W lampu LED sedangkan untuk fasa T hanya dibebani oleh 100 W lampu pijar dan 15 W lampu LED. Setelah dilakukan pengujian untuk transformator hubungan Y-Y, selanjutnya belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan ke transformator hubungan Y-Y sehingga hubungan transformator menjadi Y- Δ -Y. Kemudian dilakukan pengujian dengan kondisi yang sama seperti saat transformator hubungan Y-Y. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan seberapa besar pengaruh belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa.

4.1 Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang

4.1.1 Peralatan

Komponen peralatan yang dibutuhkan pada saat pengujian dan pengambilan data transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang adalah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan 3 fasa
2. Pengatur tegangan 3 fasa
3. Transformator 3 fasa 2 belitan hubungan Y-Y

4. Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760
5. Motor induksi 3 fasa
6. Generator DC *shunt*
7. Pengatur tegangan DC
8. Tahanan geser
9. Kabel penghubung

4.1.2 Prosedur Pengujian

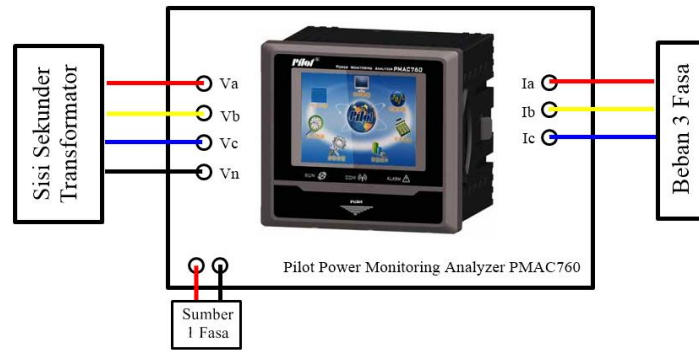
Adapun prosedur pengujian yang dilakukan pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang adalah sebagai berikut:

1. Merangkai rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.2.
 - a. Menghubungkan sisi masukan pengatur tegangan 3 fasa ke sumber AC 3 fasa dan sisi keluarannya ke sisi primer transformator.
 - b. Belitan primer dan sekunder transformator masing-masing dihubungkan Y sedangkan untuk belitan tersier tidak dihubungkan. Cara menghubungkan belitan transformator hubungan Y-Y dapat dilihat pada Gambar 4.1.



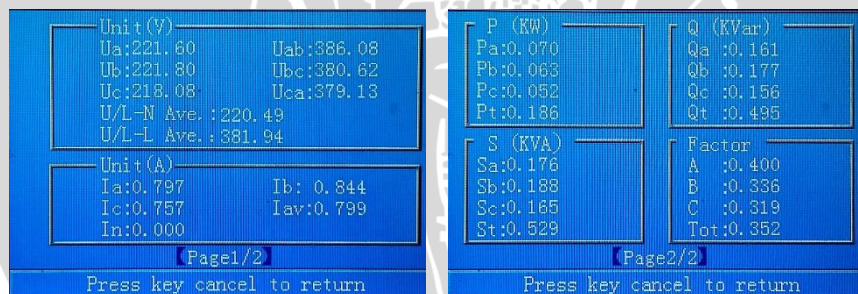
Gambar 4.1 Rangkaian Transformator Hubungan Y-Y

- a. Menghubungkan sisi sekunder transformator dengan alat ukur Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760 dan kemudian dihubungkan ke motor induksi 3 fasa yang belitan statornya terhubung delta (Δ). Cara menghubungkan Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760 dengan transformator dan beban dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Cara Menghubungkan Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760

- b. Mengkopel motor induksi 3 fasa dengan generator DC *shunt*. Generator ini akan dioperasikan sebagai generator DC penguat terpisah dimana belitan jangkar akan dihubungkan dengan tahanan geser sedangkan belitan medan dihubungkan dengan pengatur tegangan DC.
2. Mengatur pengatur tegangan 3 fasa hingga mencapai tegangan nominal transformator.
 3. Menaikkan arus beban mulai dari 0,8 A sampai dengan 1 A dengan selisih 0,05 A setiap tingkatannya.
 4. Pada setiap perubahan arus beban, catat data hasil pengukuran dari Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760. Gambar 4.3 merupakan contoh tampilan pada Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760.



Gambar 4.3 Tampilan pada Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC 760

4.1.3 Data Hasil Pengujian

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa dan dikopel generator DC *shunt* yang dioperasikan sebagai generator DC penguat terpisah. Pada pelaksanaannya arus dari motor induksi dinaikkan mulai dari 0,8 sampai dengan 1 A dengan selisih 0,05 A setiap tingkatannya. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur tahanan geser dan pengatur tegangan DC pada generator DC *shunt*.

Hasil pengukuran transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang

Fasa	I (A)		V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THD _v (%)	THD _i (%)	P (kW)		Q (kVAR)		S (kVA)		Cosφ	
	I _{rata-rata} (A)	I _{fasa} (A)					P _{fasa} (kW)	P _{total} (kW)	Q _{fasa} (kVAR)	Q _{total} (kVAR)	S _{fasa} (kVA)	S _{total} (kVA)	Cosφ _{fasa}	Cosφ _{rata-rata}
R	0,80	0,797	221,60	386,08	2,1	4,6	0,070	0,186	0,161	0,495	0,176	0,529	0,400	0,352
S		0,844	221,80	380,62	1,7	4,0	0,063		0,177		0,188		0,336	
T		0,757	218,08	379,13	1,7	4,5	0,052		0,156		0,165		0,319	
R	0,85	0,869	221,51	385,42	2,0	4,3	0,109	0,293	0,157	0,473	0,191	0,556	0,570	0,524
S		0,892	221,51	380,22	1,7	3,5	0,097		0,171		0,194		0,493	
T		0,791	218,29	379,07	1,6	4,1	0,087		0,145		0,171		0,509	
R	0,90	0,931	221,86	385,41	2,1	4,0	0,136	0,369	0,157	0,469	0,206	0,591	0,655	0,616
S		0,937	221,46	380,54	1,8	3,4	0,118		0,170		0,206		0,575	
T		0,831	218,13	379,97	1,7	4,0	0,115		0,142		0,178		0,617	
R	0,95	0,972	221,49	385,40	2,1	3,9	0,143	0,396	0,160	0,487	0,215	0,628	0,665	0,631
S		0,992	221,65	380,01	1,8	3,1	0,132		0,174		0,219		0,604	
T		0,891	218,17	379,60	1,7	3,8	0,120		0,151		0,193		0,623	
R	1,00	1,037	221,66	385,84	2,0	3,8	0,159	0,450	0,164	0,490	0,229	0,666	0,696	0,676
S		1,026	221,41	380,02	1,7	3,0	0,148		0,171		0,226		0,653	
T		0,964	218,26	379,71	1,7	3,5	0,143		0,154		0,210		0,680	

Keterangan:

I : Arus beban (A)

V_(L-N) : Tegangan fasa (volt)

V_(L-L) : Tegangan antar fasa (volt)

THD_v : Distorsi Harmonisa Tegangan Total (%)

THD_i : Distorsi Harmonisa Arus Total (%)

P : Daya nyata (kW)

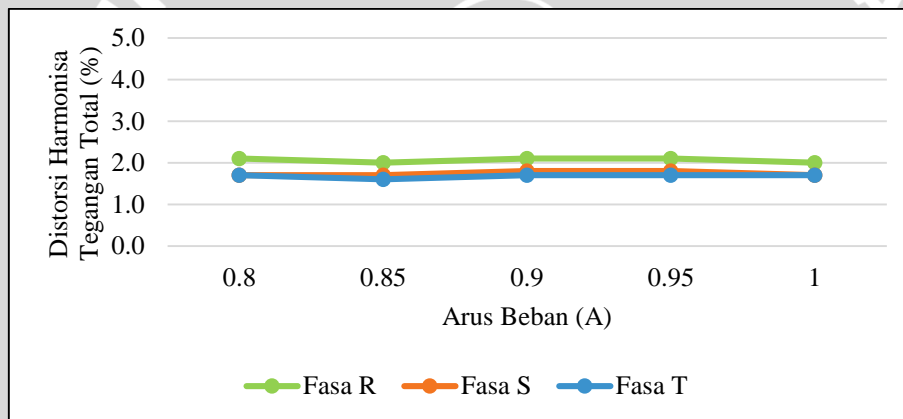
Q : Daya reaktif (kVAR)

S : Daya Semu (kVA)

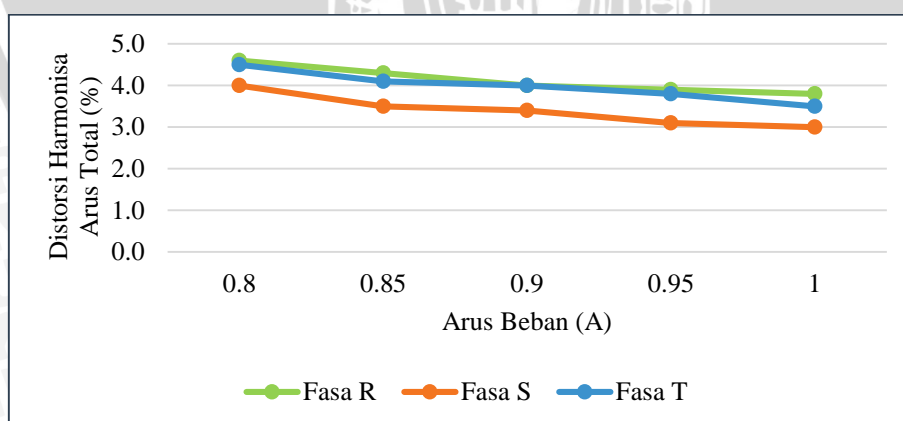
Cosφ : Faktor daya

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.1, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) pada pengujian transformator hubungan Y-Y jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 maka pengujian ini masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5%. THDv pada pengujian ini berkisar antara 1,6% hingga 2,1% dan untuk THDi berkisar antara 3,0% hingga 4,6% sehingga bentuk gelombang tegangan maupun arus yang terdistorsi harmonisa masih menyerupai gelombang sinusoidal dan harmonisa pada pengujian ini masih dapat dinyatakan aman bagi peralatan yang digunakan saat pengujian. Gelombang tegangan dan gelombang arus pada pengujian ini di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban dapat diamati pada **Lampiran 1**.

Berikut merupakan grafik hubungan antara distorsi harmonisa tegangan total terhadap arus beban, dan distorsi harmonisa arus total terhadap arus beban.



Gambar 4.4 Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban



Gambar 4.5 Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka distorsi harmonisa tegangan total (THDv) tidak

mengalami perubahan yang signifikan (relatif konstan). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai THDv paling besar terdapat pada fasa R yaitu 2,1% dengan arus beban 0,8 A, 0,9 A, dan 0,95 A, sedangkan nilai THDv paling kecil terdapat pada fasa T, yaitu 1,6% dengan arus beban 0,85 A.

Pada grafik Gambar 4.5 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka distorsi harmonisa arus total (THDi) semakin kecil. Dari grafik terlihat nilai THDi paling besar terdapat pada fasa R yaitu 4,6% dengan arus beban 0,8 A, sedangkan nilai THDi paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 3% dengan arus beban 1 A.

4.1.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total

Berdasarkan persamaan (2-7) dan (2-9) maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang.

a. Arus beban 0,8 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 221,60 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 21,66 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,6 \%}{100 \%} \times 0,797 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,34 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 221,80 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 14,22 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,0 \%}{100 \%} \times 0,844 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 218,08 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 13,74 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,5 \%}{100 \%} \times 0,757 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,16 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Hasil perhitungan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.2 (untuk perhitungan selengkapnya disajikan pada **Lampiran 2**).

Tabel 4.2 Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang

Fasa	I (A)		Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
	Irata-rata (A)	Ifasa (A)		
R	0,80	0,797	21,66	1,34
S		0,844	14,22	1,14
T		0,757	13,74	1,16
R	0,85	0,869	19,63	1,40
S		0,892	14,18	0,97
T		0,791	12,20	1,05
R	0,90	0,931	21,71	1,39
S		0,937	15,89	1,01
T		0,831	13,75	1,10
R	0,95	0,972	21,63	1,44
S		0,992	15,92	0,95
T		0,891	13,76	1,15
R	1,00	1,037	19,65	1,55
S		1,026	14,17	0,95
T		0,964	13,77	1,14

4.2 Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang

4.2.1 Peralatan

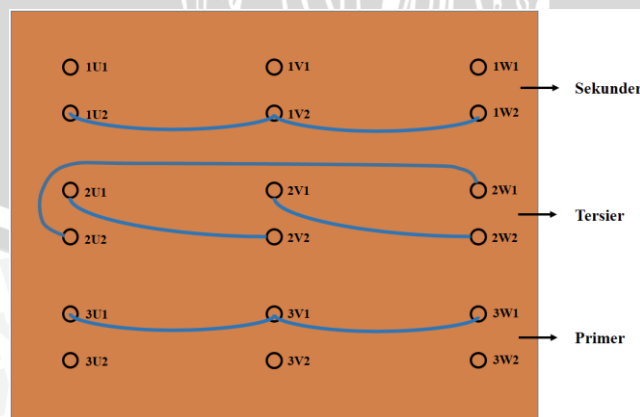
Komponen peralatan yang dibutuhkan pada saat pengujian dan pengambilan data transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan seimbang adalah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan 3 fasa
2. Pengatur tegangan 3 fasa
3. Transformator 3 fasa 3 belitan hubungan Y- Δ -Y
4. Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760
5. Motor induksi 3 fasa
6. Generator DC *shunt*
7. Pengatur tegangan DC
8. Tahanan geser
9. Kabel penghubung

4.2.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan pada transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan seimbang adalah sebagai berikut:

1. Merangkai rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.3
 - a. Menghubungkan sisi masukan pengatur tegangan 3 fasa ke sumber AC 3 fasa dan sisi keluarannya ke sisi primer transformator.
 - b. Belitan primer dan sekunder transformator masing-masing dihubungkan Y sedangkan untuk belitan tersier dihubungkan Δ . Cara menghubungkan belitan transformator hubungan Y- Δ -Y dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Rangkaian Transformator Hubungan Y- Δ -Y

- c. Menghubungkan sisi sekunder transformator dengan alat ukur Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760 dan kemudian dihubungkan ke motor induksi 3 fasa yang belitan statornya terhubung delta (Δ).
 - d. Mengkopel motor induksi 3 fasa dengan generator DC *shunt*. Generator ini akan dioperasikan sebagai generator DC penguat terpisah dimana belitan jangkar akan dihubungkan dengan tahanan geser sedangkan belitan medan dihubungkan dengan pengatur tegangan DC.
2. Mengatur pengatur tegangan 3 fasa hingga mencapai tegangan nominal transformator.
 3. Menaikkan arus beban mulai dari 0,8 A sampai dengan 1 A dengan selisih 0,05 A setiap tingkatannya.
 4. Pada setiap perubahan arus beban, catat data hasil pengukuran dari Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760.

4.2.3 Data Hasil Pengujian

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa dan dikopel generator DC *shunt* yang dioperasikan sebagai generator DC penguat terpisah. Pada pelaksanaannya arus dari motor induksi dinaikkan mulai dari 0,8 sampai dengan 1 A dengan selisih 0,05 A setiap tingkatannya. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur tahanan geser dan pengatur tegangan DC pada generator DC *shunt*.

Hasil pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang

Fasa	I (A)		$V_{(L-N)}$ (volt)	$V_{(L-L)}$ (volt)	THDv (%)	THDi (%)	P (kW)		Q (kVAR)		S (kVA)		Cos ϕ	
	$I_{rata-rata}$ (A)	I_{fasa} (A)					P_{fasa} (kW)	P_{total} (kW)	Q_{fasa} (kVAR)	Q_{total} (kVAR)	S_{fasa} (kVA)	S_{total} (kVA)	Cos ϕ fasa	Cos ϕ rata-rata
R	0,80	0,803	221,55	385,78	1,9	4,2	0,069	0,186	0,162	0,492	0,176	0,526	0,393	0,353
S		0,833	221,64	380,16	1,5	3,5	0,061		0,173		0,183		0,334	
T		0,757	218,21	379,75	1,6	4,1	0,054		0,156		0,165		0,331	
R	0,85	0,871	221,45	385,52	1,8	4,0	0,109	0,295	0,156	0,470	0,191	0,555	0,571	0,525
S		0,894	221,36	380,18	1,6	3,3	0,096		0,170		0,193		0,493	
T		0,796	218,17	379,12	1,6	3,8	0,089		0,144		0,170		0,511	
R	0,90	0,934	221,51	385,60	2,0	3,7	0,137	0,370	0,157	0,468	0,209	0,598	0,658	0,618
S		0,939	221,38	380,33	1,6	3,0	0,120		0,169		0,208		0,579	
T		0,834	218,16	379,69	1,6	3,8	0,111		0,142		0,180		0,618	
R	0,95	0,974	221,49	385,80	1,9	3,7	0,143	0,394	0,160	0,490	0,215	0,629	0,664	0,626
S		0,991	221,57	380,05	1,5	2,9	0,132		0,177		0,221		0,599	
T		0,886	218,27	379,50	1,6	3,6	0,118		0,152		0,193		0,615	
R	1,00	1,030	221,61	385,91	2,0	3,6	0,158	0,449	0,162	0,492	0,226	0,662	0,698	0,676
S		1,029	221,51	380,20	1,6	2,8	0,148		0,177		0,231		0,651	
T		0,959	218,25	379,60	1,6	3,4	0,143		0,153		0,204		0,678	

Keterangan:

I : Arus beban (A)

 $V_{(L-N)}$: Tegangan fasa (volt) $V_{(L-L)}$: Tegangan antar fasa (volt)

THDv : Distorsi Harmonisa Tegangan Total (%)

THDi : Distorsi Harmonisa Arus Total (%)

P : Daya nyata (kW)

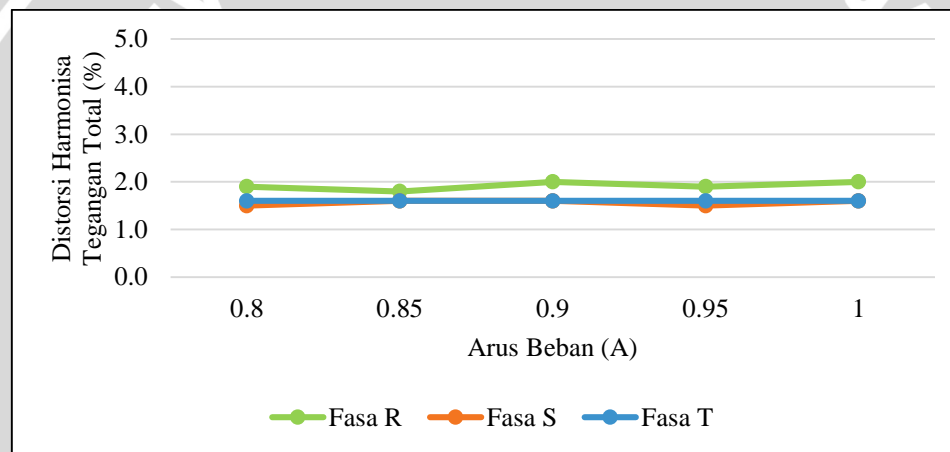
Q : Daya reaktif (kVAR)

S : Daya Semu (kVA)

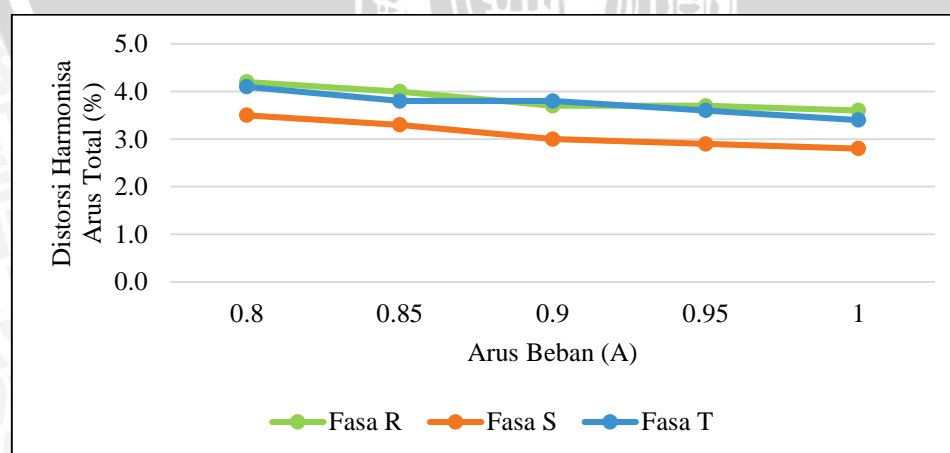
Cos ϕ : Faktor daya

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.3, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) pada pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 maka pengujian ini masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5%. THDv pada pengujian ini berkisar antara 1,5% hingga 2,0% dan untuk THDi berkisar antara 2,8% hingga 4,2% sehingga bentuk gelombang tegangan maupun arus yang terdistorsi harmonisa masih menyerupai gelombang sinusoidal dan harmonisa pada pengujian ini masih dapat dinyatakan aman bagi peralatan yang digunakan saat pengujian. Gelombang tegangan dan gelombang arus pada pengujian ini di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban dapat diamati pada **Lampiran 3**.

Berikut merupakan grafik hubungan antara distorsi harmonisa tegangan terhadap arus beban, dan distorsi harmonisa arus terhadap arus beban.



Gambar 4.7 Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban



Gambar 4.8 Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.7 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv)

tidak mengalami perubahan yang signifikan (relatif konstan). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai THD_v paling besar terdapat pada fasa R yaitu 2,0% dengan arus beban 0,9 A dan 1 A, sedangkan nilai THD_v paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 1,5% dengan arus beban 0,8 A dan 0,95 A.

Pada grafik Gambar 4.8 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka Distorsi Harmonisa Arus Total (THD_i) semakin kecil. Dari grafik terlihat nilai THD_i paling besar terdapat pada fasa R yaitu 4,2% dengan arus beban 0,8 A, sedangkan nilai THD_i paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 2,8% dengan arus beban 1 A.

4.2.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total

Berdasarkan persamaan (2-7) dan (2-9) maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Δ-Y dengan pembebanan seimbang.

a. Arus beban 0,8 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa Total

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,9 \%}{100 \%} \times 221,55 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 17,72 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,2 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,2 \%}{100 \%} \times 0,803 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa Total

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,5 \%}{100 \%} \times 221,64 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 11,05 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,5 \%}{100 \%} \times 0,833 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,85 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– **Fasa T**

Tegangan Harmonisa Total

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,21 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,19 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,1 \%}{100 \%} \times 0,757 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,96 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Hasil perhitungan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Δ-Y dengan pembebanan seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.14 (untuk perhitungan selengkapnya disajikan pada **Lampiran 4**).

Tabel 4.4 Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Δ-Y dengan Pembebanan Seimbang

Fasa	I (A)		Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
	Irata-rata (A)	Iper fasa (A)		
R	0,80	0,803	17,72	1,14
S		0,833	11,05	0,85
T		0,757	12,19	0,96
R	0,85	0,871	15,89	1,21
S		0,894	12,54	0,87
T		0,796	12,19	0,91
R	0,90	0,934	19,63	1,19
S		0,939	12,55	0,79
T		0,834	12,18	1,00
R	0,95	0,974	17,71	1,30
S		0,991	11,05	0,83
T		0,886	12,20	1,02
R	1,00	1,030	19,64	1,45
S		1,029	12,56	0,83
T		0,959	12,19	1,06

4.3 Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa

Pada setiap transformator akan selalu terdapat harmonisa. Harmonisa ini dihasilkan ketika proses penginduksian/magnetisasi pada inti besi. Proses ini akan menghasilkan fluksi yang tentunya juga akan menghasilkan arus pada inti transformator berupa arus eddy (pusar). Namun, ketika inti besi pada suatu transformator telah mencapai titik jenuhnya akan menyebabkan fluksi tidak tertampung lagi yang mengakibatkan sifat ketidaklinieran dari transformator. Jadi tegangan sinusoidal murni dari sumber tegangan menghasilkan arus magnetisasi yang terdiri dari arus dengan frekuensi fundamental ditambah dengan komponen harmonisa yang besar. Namun, pada transformator fasa tunggal gelombang arus tersebut hanya sedikit terdistorsi karena arus magnetisasinya kecil jika dibandingkan dengan arus beban. Lain halnya apabila transformator tiga fasa. Pada transformator ini ketiga arus magnetisasi frekuensi fundamental tetap berbeda fasa 120° , namun arus harmonisanya tetap sefasa. Akibat hal ini ketiga komponen harmonisa tersebut pada masing-masing belitan menghasilkan bentuk tegangan sekunder yang mengandung distorsi tegangan harmonisa yang cukup besar, apabila hubungan belitannya adalah Y tanpa adanya rangkaian tertutup pada titik netralnya. Jika hubungan belitannya adalah tertutup, seperti dalam bentuk sambungan Δ , maka harmonisa bisa bersirkulasi dan akibatnya harmonisa tersebut tertindas, sehingga distorsi tegangan sekunder yang dihasilkan akan berkurang.

Berdasarkan hasil pengukuran yang telah diperoleh, pengaruh harmonisa yaitu THD_v dan THD_i terhadap sistem kelistrikan dapat menyebabkan gelombang tegangan dan gelombang arus mengalami distorsi sehingga bentuk gelombang mengalami perubahan dari bentuk gelombang awalnya (sinusoidal). Besar tidaknya perbedaan bentuk gelombang awal dengan gelombang yang terdistorsi tergantung dari besarnya nilai THD_v dan THD_i. Semakin besar nilai THD_v maupun THD_i yang terukur, maka bentuk gelombang tegangan maupun gelombang arus yang terdistorsi akan semakin jauh dari bentuk gelombang sinusoidal murni.

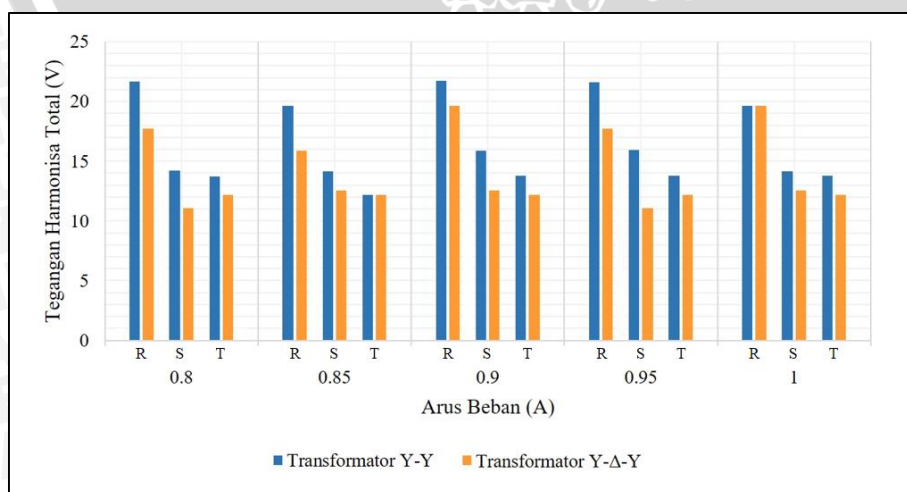
Pada pengujian transformator baik dengan hubungan Y-Y maupun Y- Δ -Y dengan pembebanan seimbang, semakin besar arus beban maka nilai THD_i semakin kecil sedangkan nilai THD_v tetap. Nilai THD_v maupun THD_i pada transformator hubungan Y-Y semakin berkurang ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) sehingga gelombang terdistorsi pada transformator hubungan Y- Δ -Y akan lebih mendekati sinusoidal dari pada transformator hubungan Y-Y. Hal tersebut dapat diamati pada **Lampiran 1** dan **Lampiran 3**.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total pada transformator hubungan Y-Y dan hubungan Y- Δ -Y masing-masing pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.4, maka dapat digabungkan antara keduanya pada Tabel 4.5 untuk membandingkan harmonisa pada kedua hubungan tersebut dan menentukan selisihnya di setiap fasa dan setiap perubahan beban.

Tabel 4.5 Perbandingan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dan Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang

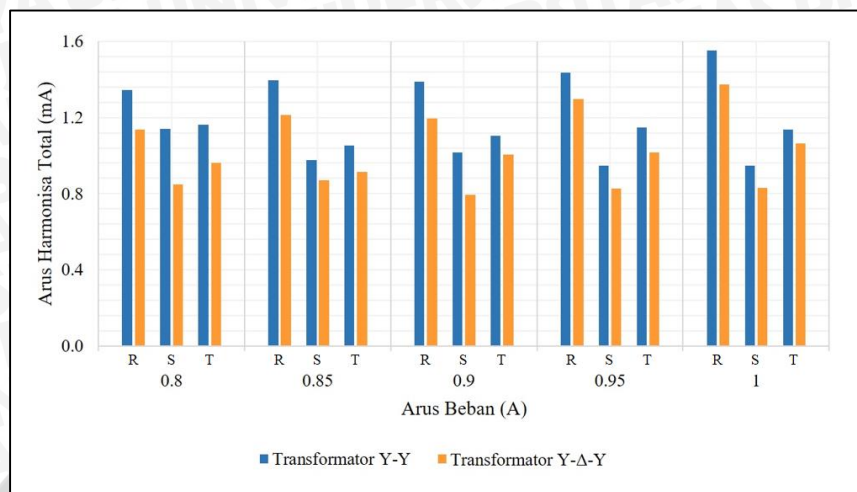
Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)			Arus Harmonisa Total (mA)		
		Trafo Y-Y	Trafo Y- Δ -Y	Selisih	Trafo Y-Y	Trafo Y- Δ -Y	Selisih
R	0,8	21,66	17,72	3,94	1,34	1,14	0,20
S		14,22	11,05	3,16	1,14	0,85	0,29
T		13,74	12,19	1,55	1,16	0,96	0,20
R	0,85	19,63	15,89	3,74	1,40	1,21	0,18
S		14,18	12,54	1,64	0,97	0,87	0,10
T		12,20	12,19	0,01	1,05	0,91	0,14
R	0,9	21,71	19,63	2,08	1,39	1,19	0,19
S		15,89	12,55	3,34	1,01	0,79	0,22
T		13,75	12,18	1,57	1,10	1,00	0,10
R	0,95	21,63	17,71	3,92	1,44	1,30	0,14
S		15,92	11,05	4,87	0,95	0,83	0,12
T		13,76	12,20	1,56	1,15	1,02	0,13
R	1	19,65	19,64	0,01	1,55	1,37	0,18
S		14,17	12,56	1,61	0,95	0,83	0,12
T		13,77	12,19	1,57	1,14	1,06	0,08

Berikut ini grafik hubungan tegangan harmonisa total terhadap arus beban pada transformator hubungan Y-Y dan Y- Δ -Y di setiap fasanya.



Gambar 4.9 Hubungan Tegangan Harmonisa Total terhadap Arus Beban

Sedangkan untuk grafik hubungan arus harmonisa total terhadap arus beban di setiap fasanya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.10 Hubungan Arus Harmonisa Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat diamati bahwa transformator hubungan Y-Y yang dibebani oleh motor induksi 3 fasa dan dikopel dengan generator DC *shunt* mengalami penurunan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban ketika ditambahkan belitan tersier yang terhubung delta (Δ). Hal tersebut dapat diamati pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 bahwa grafik harmonisa pada transformator hubungan Y- Δ -Y selalu lebih kecil/pendek dari grafik harmonisa pada transformator hubungan Y-Y.

Pada transformator hubungan Y-Y, tegangan harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 19,63 V hingga 21,71 V, pada fasa S antara 14,17 V hingga 15,92 V, dan pada fasa T antara 12,20 V hingga 13,77 V. Untuk arus harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 1,34 mA hingga 1,55 mA, pada fasa S antara 0,95 mA hingga 1,14 mA, dan pada fasa T antara 1,05 mA hingga 1,16 mA.

Sedangkan pada transformator hubungan Y- Δ -Y, tegangan harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 15,89 V hingga 19,64 V, pada fasa S antara 11,05 V hingga 12,56 V, dan pada fasa T antara 12,18 V hingga 12,20 V. Untuk arus harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 1,14 mA hingga 1,37 mA, pada fasa S antara 0,79 mA hingga 0,87 mA, dan pada fasa T antara 0,91 mA hingga 1,06 mA.

Berdasarkan perhitungan selisih tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total pada Tabel 4.5 dapat diamati bahwa tegangan harmonisa total maupun arus harmonisa total

pada transformator hubungan Y-Y berkurang ketika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan. Belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total pada fasa R hingga 3,94 V, pada fasa S hingga 4,87 V, dan pada fasa T hingga 1,57 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total berkurang pada fasa R hingga 0,20 mA, pada fasa S hingga 0,29 mA, dan pada fasa T hingga 0,20 mA pada kondisi arus beban tertentu.

4.4 Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

4.4.1 Peralatan

Komponen peralatan yang dibutuhkan pada saat pengujian dan pengambilan data transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang adalah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan 3 fasa
2. Pengatur tegangan 3 fasa
3. Transformator 3 fasa 2 belitan hubungan Y-Y
4. Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760
5. Lampu Pijar
6. Lampu LED
7. Kabel penghubung

4.4.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang adalah sebagai berikut:

1. Merangkai rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.4.
 - a. Menghubungkan sisi masukan pengatur tegangan 3 fasa ke sumber AC 3 fasa dan sisi keluarannya ke sisi primer transformator.
 - b. Belitan primer dan sekunder transformator masing-masing dihubungkan Y sedangkan untuk belitan tersier tidak dihubungkan.
 - c. Menghubungkan sisi sekunder transformator dengan alat ukur Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760 dan kemudian dihubungkan ke lampu pijar dan lampu LED yang telah disusun paralel dan dihubung Y.
 - d. Pada fasa R dan S masing-masing dibebani oleh 500 W lampu pijar dan 15 W lampu LED, sedangkan fasa T hanya dibebani oleh 100 W lampu pijar dan 15 W lampu LED.
2. Mengatur pengatur tegangan 3 fasa hingga tegangan rata-rata 120 V (fasa).
3. Mencatat data hasil pengukuran dari Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760.

4.4.3 Data Hasil Pengujian

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan lampu pijar dan lampu LED yang telah tersusun paralel dan dihubung Y. Lampu pijar digunakan agar mendapatkan resistansi yang besar sedangkan lampu LED berfungsi sebagai penghasil harmonisa dikarenakan lampu ini termasuk jenis beban non linier.

Hasil pengujian transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

Fasa	I (A)	V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THD _v (%)	THD _i (%)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Cosφ
R	1,576	116,34	201,34	2,4	2,1	0,183	0,000	0,192	1,00
S	1,617	119,62	210,32	2,2	2,5	0,193	0,000	0,195	1,00
T	0,345	125,10	213,39	2,3	7,4	0,043	-0,004	0,043	0,99
I _N (A)						1,336			

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.6, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THD_v) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THD_i) pada pengujian transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5% kecuali THD_i pada fasa T dikarenakan THD_i pada fasa ini sebesar 7,4% sehingga gelombang arus pada fasa ini cenderung lebih buruk dari gelombang tegangan maupun arus pada fasa yang lain dan harmonisa pada fasa ini dapat dinyatakan tidak aman bagi peralatan yang digunakan saat pengujian. Gelombang tegangan dan gelombang arus pada pengujian ini di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban dapat diamati pada **Lampiran 5**. THD_i pada fasa T jauh lebih besar dikarenakan arus beban yang mengalir lebih besar pada lampu LED dari pada lampu pijar, sedangkan pada fasa yang lain arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar karena pada fasa tersebut terdapat lima lampu pijar sehingga arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar dan THD_i yang dihasilkannya juga tidak sebesar seperti pada fasa T.

4.4.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total

Berdasarkan persamaan (2-7) dan (2-9) maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang.

– Fasa R

Tegangan Harmonisa Total

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,4 \%}{100 \%} \times 116,34 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 7,80 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 1,576 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,1 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa Total

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,2 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,2 \%}{100 \%} \times 119,62 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 6,93 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,5 \%}{100 \%} \times 1,617 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,63 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa Total

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,3 \%}{100 \%} \times 125,10 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 8,28 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$7,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{7,4 \%}{100 \%} \times 0,345 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,65 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Hasil perhitungan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
R	1,576	7,80	1,10
S	1,617	6,93	1,63
T	0,345	8,28	0,65

4.5 Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

4.5.1 Peralatan

Komponen peralatan yang dibutuhkan pada saat pengujian dan pengambilan data transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang adalah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan 3 fasa
2. Pengatur tegangan 3 fasa
3. Transformator 3 fasa 3 belitan hubungan Y- Δ -Y
4. Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760
5. Lampu Pijar
6. Lampu LED
7. Kabel penghubung

4.5.2 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan pada transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang adalah sebagai berikut:

1. Merangkai rangkaian pengujian seperti pada Gambar 3.5.
 - a. Menghubungkan sisi masukan pengatur tegangan 3 fasa ke sumber AC 3 fasa dan sisi keluarannya ke sisi primer transformator.
 - b. Belitan primer dan sekunder transformator masing-masing dihubungkan Y sedangkan untuk belitan tersier dihubungkan Δ .
 - c. Menghubungkan sisi sekunder transformator dengan alat ukur Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760 dan kemudian dihubungkan ke lampu pijar dan lampu LED yang telah disusun paralel dan dihubung Y.

- d. Pada fasa R dan S masing-masing dibebani oleh 500 W lampu pijar dan 15 W lampu LED, sedangkan fasa T hanya dibebani oleh 100 W lampu pijar dan 15 W lampu LED.
2. Mengatur pengatur tegangan 3 fasa hingga tegangan rata-rata 120 V (fasa).
3. Mencatat data hasil pengukuran dari Pilot *Power Monitoring Analyzer* PMAC760.

4.5.3 Data Hasil Pengujian

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan lampu pijar dan lampu LED yang telah tersusun paralel dan dihubung Y. Lampu pijar digunakan agar mendapatkan resistansi yang besar sedangkan lampu LED berfungsi sebagai penghasil harmonisa dikarenakan lampu ini termasuk jenis beban non linier.

Hasil pengukuran transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran pada Pengujian Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

Fasa	I (A)	V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THD _v (%)	THD _i (%)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Cos ϕ
R	1,583	117,68	201,43	2,1	2,0	0,186	0,000	0,186	1,00
S	1,600	117,43	210,42	2,1	2,4	0,188	0,000	0,188	1,00
T	0,346	125,72	213,17	2,2	7,0	0,043	-0,004	0,043	0,99
I_N (A)	1,310								

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.8, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THD_v) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THD_i) pada pengujian transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5% kecuali THD_i pada fasa T dikarenakan THD_i pada fasa ini sebesar 7% sehingga gelombang arus pada fasa ini cenderung lebih buruk dari gelombang tegangan maupun arus pada fasa yang lain dan harmonisa pada fasa ini dapat dinyatakan tidak aman bagi peralatan yang digunakan saat pengujian. Gelombang tegangan dan gelombang arus pada pengujian ini di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban dapat diamati pada **Lampiran 6**. THD_i pada fasa T jauh lebih besar dikarenakan arus beban yang mengalir lebih besar pada lampu LED dari pada lampu pijar, sedangkan pada fasa yang lain arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar karena pada fasa tersebut terdapat lima lampu pijar sehingga arus

yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar dan THDi yang dihasilkannya juga tidak sebesar seperti pada fasa T.

4.5.4 Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total

Berdasarkan persamaan (2-7) dan (2-9) maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang.

- Fasa R

Tegangan Harmonisa Total

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 117,68 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 6,11 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,0 \%}{100 \%} \times 1,583 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,00 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa S

Tegangan Harmonisa Total

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 117,43 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 6,08 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,4 \%}{100 \%} \times 1,600 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,47 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa T

Tegangan Harmonisa Total

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,2 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,2 \%}{100 \%} \times 125,72 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 7,65 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa Total

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$7,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{7,0 \%}{100 \%} \times 0,346 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,59 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Hasil perhitungan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total pada transformator hubungan Y- Δ -Y dengan pembebanan tidak seimbang ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang

Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
R	1,583	6,11	1,00
S	1,600	6,08	1,47
T	0,346	7,65	0,59

4.6 Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa

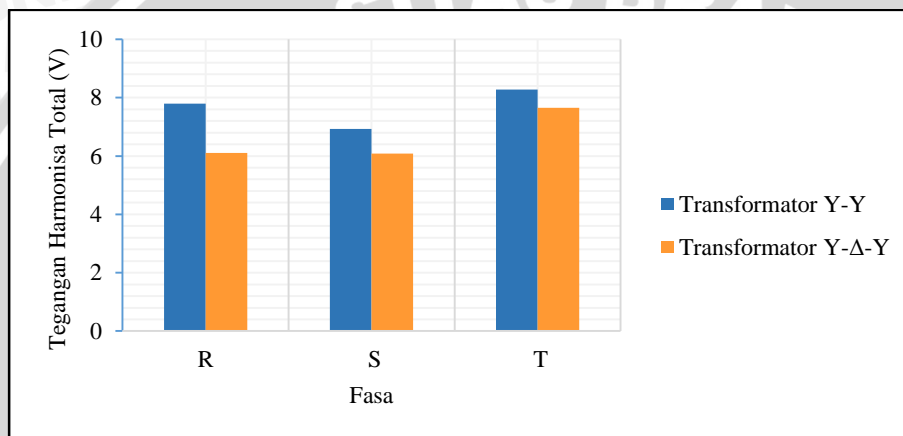
Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa. Ketika transformator hubungan Y-Y dibebani oleh beban tidak seimbang akan mengakibatkan tegangan fasanya sangat tidak seimbang. Semakin besar ketidakseimbangan tegangan tersebut tentunya akan memperbesar arus pada penghantar netral yang akan membuat rugi-rugi pada transformator semakin besar. Belitan tersier yang terhubung delta (Δ) selain digunakan untuk mengurangi harmonisa juga dapat digunakan untuk memperbaiki tegangan tidak seimbang pada transformator hubungan Y-Y. Hal tersebut dapat diamati pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.8 dimana arus netral pada transformator hubungan Y-Y sebesar 1,336 A sedangkan arus netral pada transformator hubungan Y- Δ -Y sebesar 1,310 A. Arus netral pada transformator hubungan Y- Δ -Y lebih kecil dari pada transformator hubungan Y-Y yang menunjukkan bahwa belitan tersier yang terhubung (Δ) dapat memperbaiki ketidakseimbangan tegangan pada transformator hubungan Y-Y.

Pada perhitungan yang telah dilakukan untuk tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di transformator hubungan Y-Y dan hubungan Y- Δ -Y masing-masing pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.9, maka dapat digabungkan antara keduanya pada Tabel 4.10 untuk membandingkan harmonisa pada kedua hubungan tersebut dan menentukan selisihnya di setiap fasa.

Tabel 4.10 Perbandingan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dan Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang

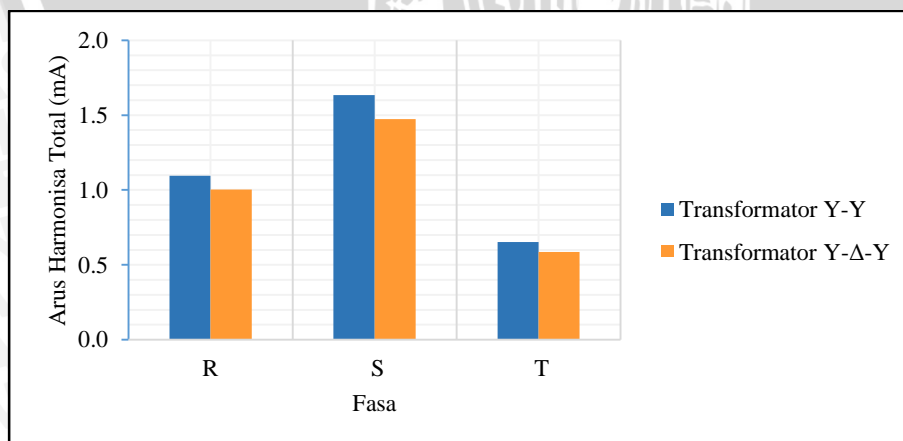
Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)			Arus Harmonisa Total (mA)		
		Trafo Y-Y	Trafo Y- Δ -Y	Selisih	Trafo Y-Y	Trafo Y- Δ -Y	Selisih
R	1,6	7,80	6,11	1,69	1,10	1,00	0,10
S	1,6	6,93	6,08	0,85	1,63	1,47	0,16
T	0,3	8,28	7,65	0,63	0,65	0,59	0,06

Berikut ini grafik tegangan harmonisa total transformator hubungan Y-Y dan Y- Δ -Y di setiap fasanya.



Gambar 4.11 Tegangan Harmonisa Total pada Setiap Fasa

Sedangkan untuk grafik arus harmonisa total di setiap fasanya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.12 Arus Harmonisa Total pada Setiap Fasa

Berdasarkan Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, dapat diamati bahwa transformator hubungan Y-Y yang dibebani oleh lampu pijar dan lampu LED yang disusun paralel dan terhubung Y dengan besar daya pada fasa R dan S adalah 515 W sedangkan pada fasa T 115 W, mengalami penurunan tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasanya ketika ditambahkan belitan tersier yang di hubung delta (Δ). Hal tersebut dapat diamati pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 bahwa grafik harmonisa pada transformator hubungan Y- Δ -Y selalu lebih kecil/pendek dari grafik harmonisa pada transformator hubungan Y-Y.

Pada transformator hubungan Y-Y, tegangan harmonisa total yang terkandung pada fasa R sebesar 7,8 V, pada fasa S sebesar 6,93 V, dan pada fasa T sebesar 8,28 V. Untuk harmonisa total yang terkandung pada fasa R sebesar 1,10 mA, pada fasa S sebesar 1,63 mA, dan pada fasa T sebesar 0,65 mA.

Sedangkan pada transformator hubungan Y- Δ -Y, tegangan harmonisa total yang terkandung pada fasa R sebesar 6,11 V, pada fasa S sebesar 6,08 V, dan pada fasa T sebesar 7,65 V. Untuk harmonisa total yang terkandung pada fasa R sebesar 1,00 mA, pada fasa S sebesar 1,47 mA, dan pada fasa T sebesar 0,59 mA.

Berdasarkan perhitungan selisih tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total pada Tabel 4.10 dapat diamati bahwa tegangan harmonisa total maupun arus harmonisa total pada transformator hubungan Y-Y berkurang ketika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan. Belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total pada fasa R sebesar 1,69 V, pada fasa S sebesar 0,85 V, dan pada fasa T sebesar 0,63 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total, pada fasa R berkurang sebesar 0,1 mA, pada fasa S berkurang sebesar 0,16, dan pada fasa T berkurang sebesar 0,06 mA.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari data hasil pengujian dan analisis penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. a) Tegangan harmonisa total yang terkandung pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 19,63 V hingga 21,71 V, pada fasa S antara 14,17 V hingga 15,92 V, dan pada fasa T antara 12,20 V hingga 13,77 V. Untuk arus harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban pada fasa R antara 1,34 mA hingga 1,55 mA, pada fasa S antara 0,95 mA hingga 1,14 mA, dan pada fasa T antara 1,05 mA hingga 1,16 mA.
- b) Untuk keadaan beban tidak seimbang, tegangan harmonisa total yang terkandung pada transformator hubungan Y-Y pada fasa R sebesar 7,8 V, pada fasa S sebesar 6,93 V, dan pada fasa T sebesar 8,28 V. Untuk harmonisa total yang terkandung pada fasa R sebesar 1,10 mA, pada fasa S sebesar 1,63 mA, dan pada fasa T sebesar 0,65 mA.
2. a) Penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang dapat mengurangi kandungan harmonisa. Tegangan harmonisa total yang terkandung pada transformator berkurang menjadi, pada fasa R antara 15,89 V hingga 19,64 V, pada fasa S antara 11,05 V hingga 12,56 V, dan pada fasa T antara 12,18 V hingga 12,20 V. Untuk arus harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban mengalami penurunan menjadi, pada fasa R antara 1,14 mA hingga 1,37 mA, pada fasa S antara 0,79 mA hingga 0,87 mA, dan pada fasa T antara 0,91 mA hingga 1,06 mA. Belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total pada fasa R hingga 3,94 V, pada fasa S hingga 4,87 V, dan pada fasa T hingga 1,57 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total berkurang pada fasa R hingga 0,20 mA, pada fasa S hingga 0,29 mA, dan pada fasa T hingga 0,29 mA pada kondisi arus beban tertentu.



- b) Pada keadaan beban tidak seimbang, belitan tersier juga mampu mengurangi harmonisa. Tegangan harmonisa total pada fasa R, S, dan T turun berturut-turut menjadi 6,11 V, 6,08 V, dan 7,65 V atau mengalami penurunan berturut-turut sebesar 1,69 V, 0,85 V, dan 0,63 V. Untuk arus harmonisa total pada fasa R, S, dan T turun berturut-turut menjadi 1 mA, 1,47 mA, dan 0,59 mA atau mengalami penurunan berturut turut sebesar 0,1 mA, 0,16 mA, dan 0,06 mA.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penyempurnaan penelitian ini maupun selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk penggunaan beban non linier yang menghasilkan harmonisa sangat besar.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang penggunaan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) dengan kapasitas yang berbeda-beda.



DAFTAR PUSTAKA

- Arrillaga, Jos, dan Watson, Naville R. 2003. *Power System Harmonics, second edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Burke, James J. 1994. *Power Distribution Engineering-Fundamentals and Applications*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Cahyani, Arfinna. 2014. *Studi Analisis Pengaruh Harmonisa Beban Nonlinier Rumah tangga Terhadap Hasil Penunjukan kWh Meter Digital 1 Fasa*. Skripsi, Tidak Dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Chapman, Stephen J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals fourth edition*. New York: McGraw-Hill.
- Dugan, Roger C & McGranaghan, Mark F. 2003. *Electrical Power Systems Quality*. New York: McGraw-Hill.
- Esy, Bintang Mufti Z. 2016. *Analisis Pengaruh Harmonisa pada Variable Speed Drive terhadap Hasil Penunjukan kWh Meter 3 Fasa*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Kadir, Abdul. 1989. *Transformator*. Jakarta: PT. Elek Media Komputindo.
- Kapp, R. O., dan Pearson, A. R. 1955. The Performance of Star-star Transformers. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*. I (1): 9-12
- Kusko, Alexander, dan Thompson, Marc T. 2007. *Power Quality in Electrical Systems*. New York: McGraw-Hill.
- Sankaran, C. 2002. *Power Quality*. New York : CRC Press LLC.
- Setiadji, Julius Sentosa. 2006. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi. *Jurnal Teknik Elektro*. VI (1): 68-73.
- Sudirham, Sudaryatno. 2010. *Analisis Rangkaian Listrik Jilid 3*. Bandung: ITB.
- Sugiarto, Hadi. 2012. Kajian Harmonisa Arus dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak. *ISSN 1693-9085*. VIII (2): 80-89.
- Syahwil, Muhammad, Tola, Muhammad, & Manjang, Salama. 2010. Studi Dampak Harmonisa terhadap Susut Teknis pada Industri Semen (Kasus Industri Semen Tonasa). *Media Elektrik*. V (2).
- Winders, John J. 2002. *Power Transformers Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker Inc.

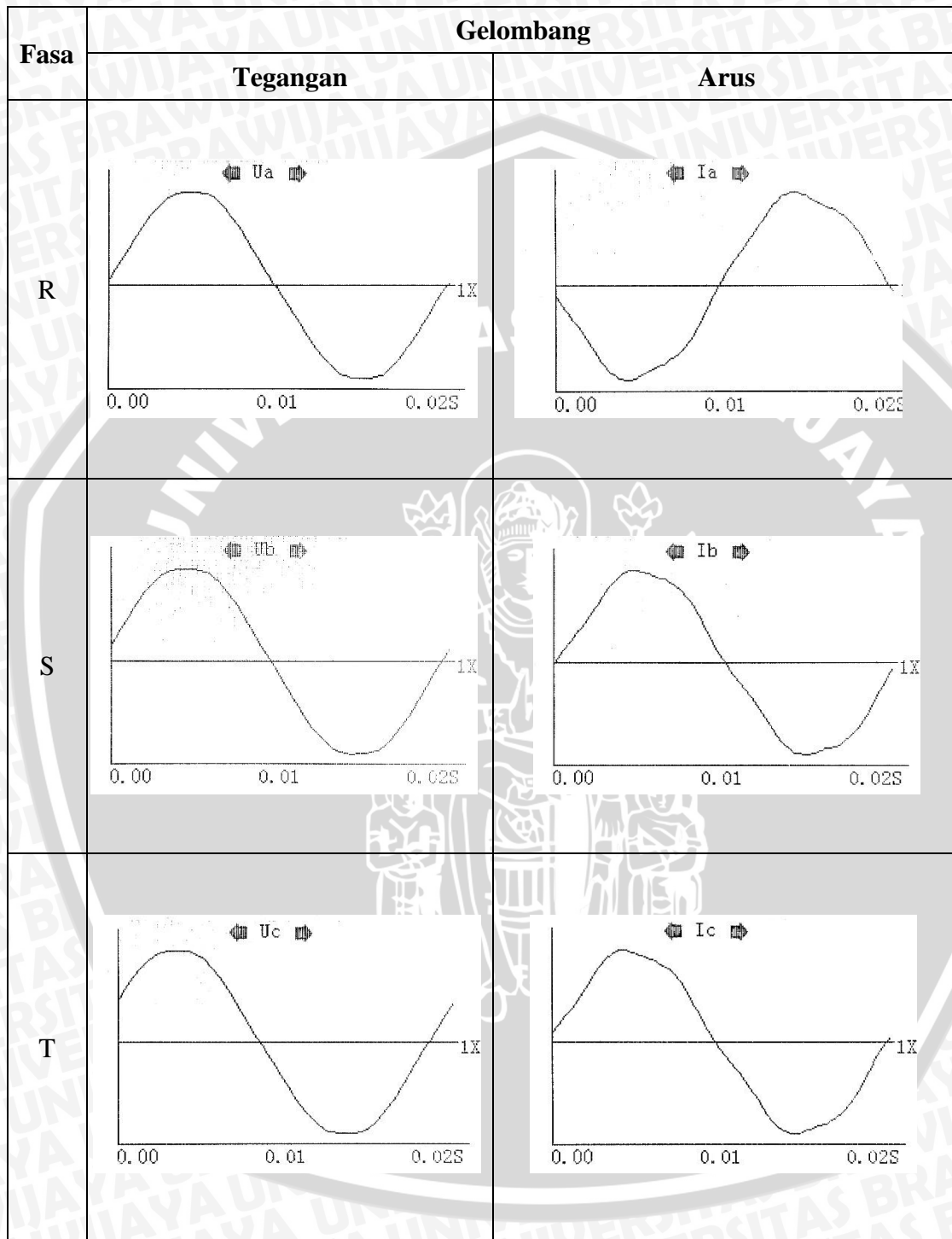




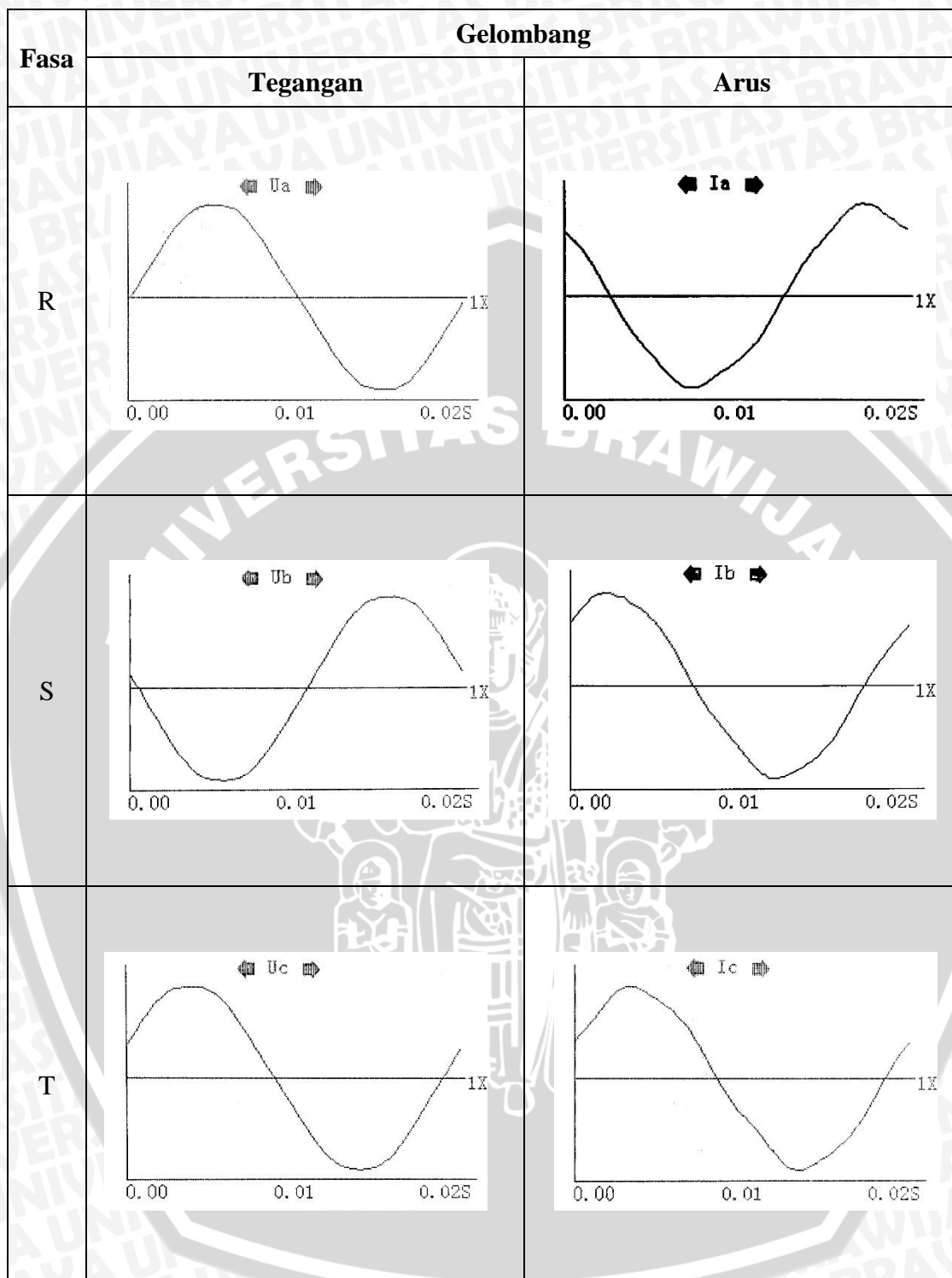
LAMPIRAN

Lampiran 1. Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang

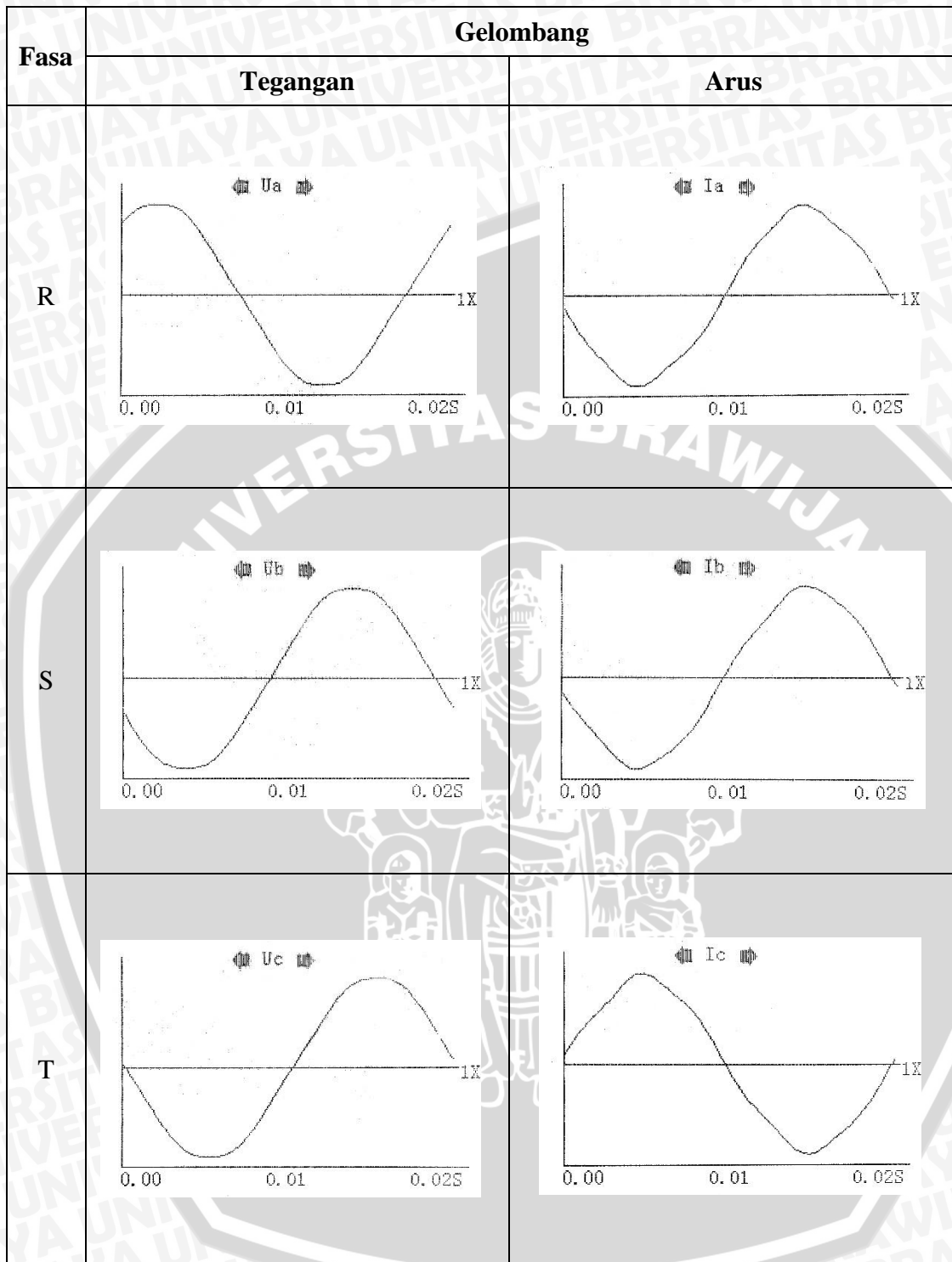
a) Arus Beban 0,8 A



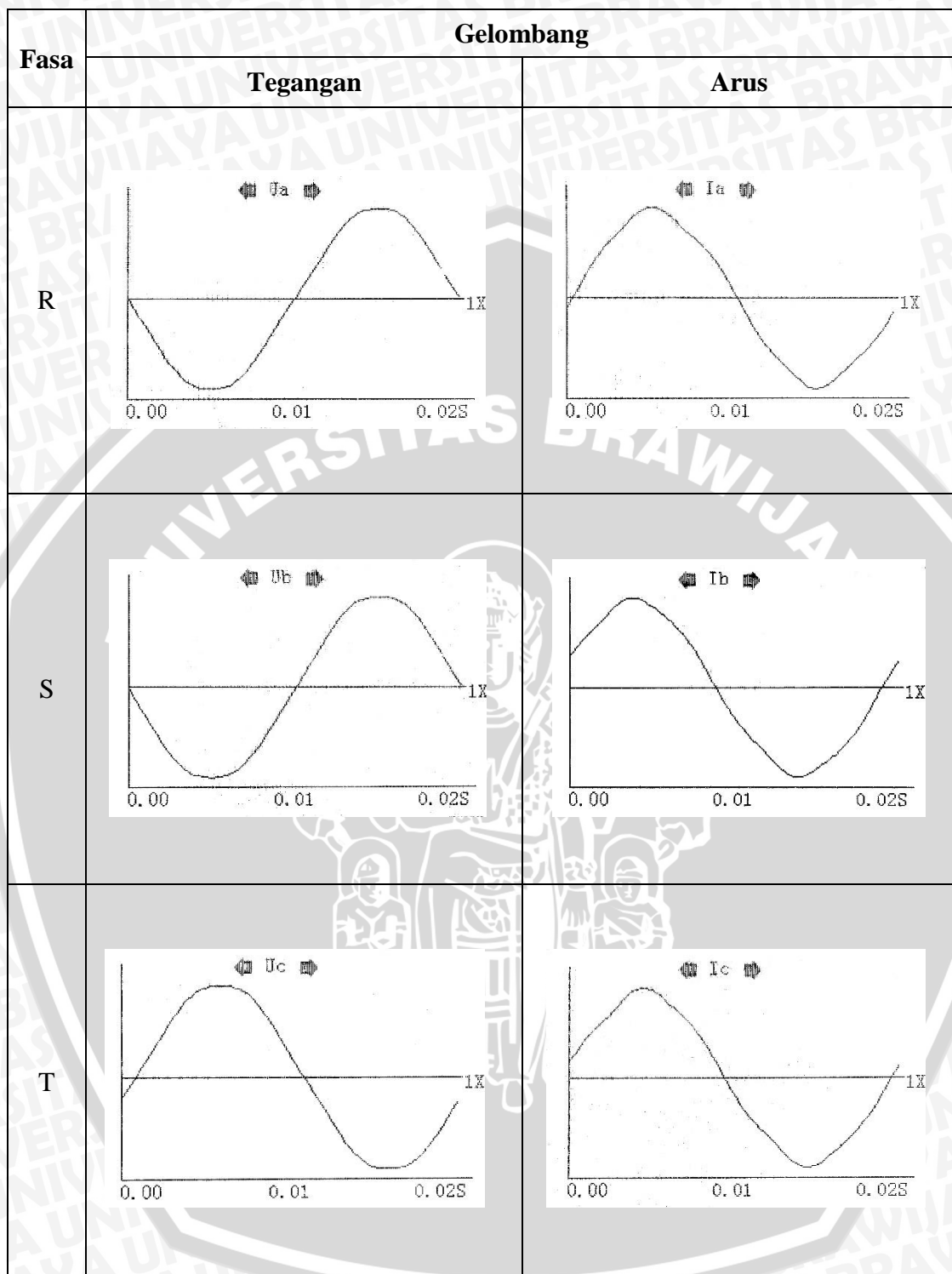
b) Arus Beban 0,85 A



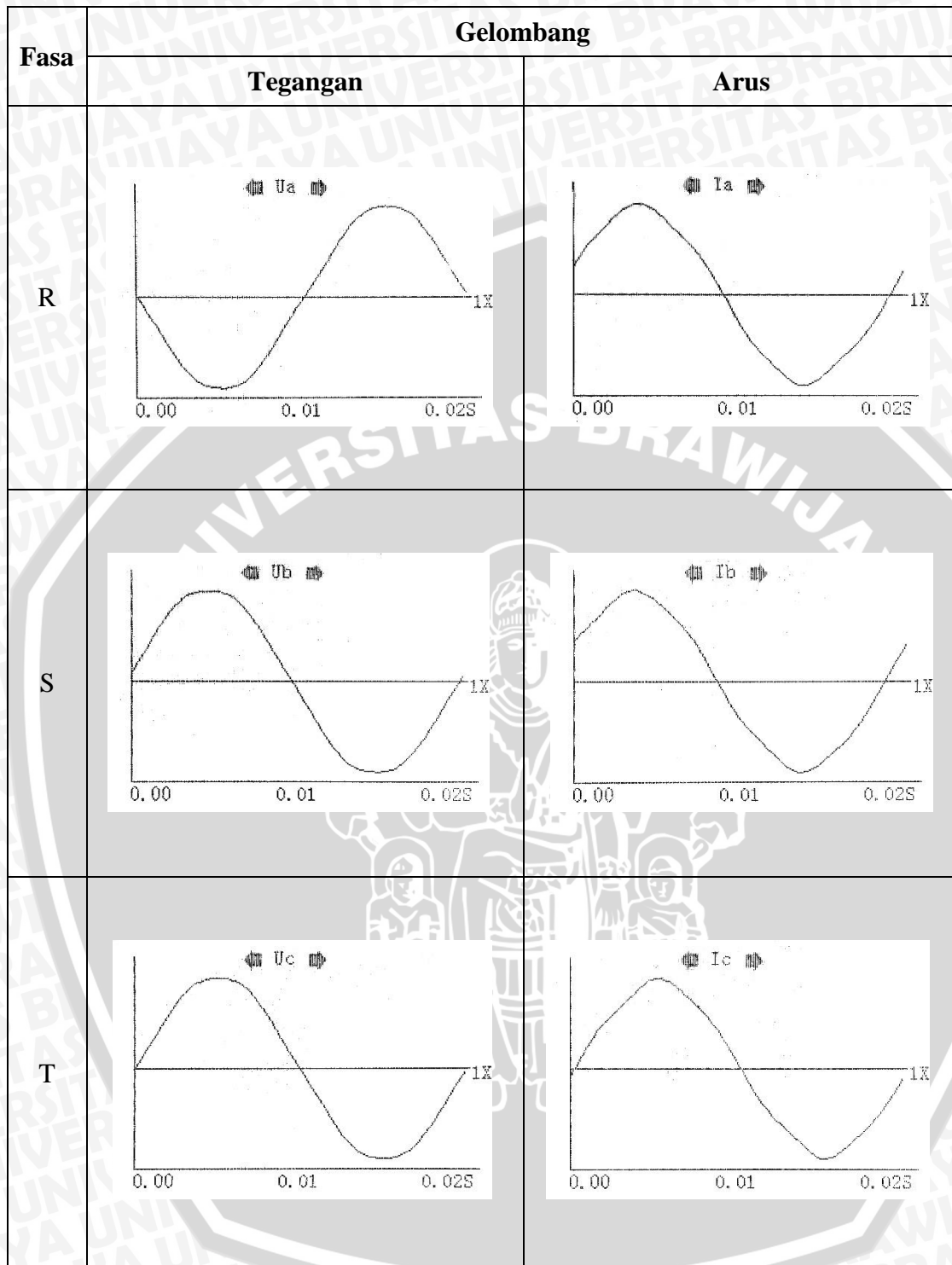
c) Arus Beban 0,90 A



d) Arus Beban 0,95 A



e) Arus Beban 1,00 A



Lampiran 2. Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Seimbang

a) Arus beban 0,8 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 221,60 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 21,66 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,6 \%}{100 \%} \times 0,797 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,34 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 221,80 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 14,22 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,0 \%}{100 \%} \times 0,844 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 218,08 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 13,74 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,5 \%}{100 \%} \times 0,757 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,16 \times 10^{-3} \text{ A}$$

b) Arus beban 0,85 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,0 \%}{100 \%} \times 221,51 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 19,63 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,3 \%}{100 \%} \times 0,869 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,40 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 221,51 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 14,18 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,5 \%}{100 \%} \times 0,892 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,97 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,29 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,20 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,1 \%}{100 \%} \times 0,791 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,05 \times 10^{-3} \text{ A}$$

c) Arus beban 0,9 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 221,86 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 21,71 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,0 \%}{100 \%} \times 0,931 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,39 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,8 \%}{100 \%} \times 221,46 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 15,89 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,4 \%}{100 \%} \times 0,937 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,01 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 218,13 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 13,75 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,0 \%}{100 \%} \times 0,831 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,10 \times 10^{-3} \text{ A}$$

d) Arus beban 0,95 A**- Fasa R**Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,1 \%}{100 \%} \times 221,49 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 21,63 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,9 \%}{100 \%} \times 0,972 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,44 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa STegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,8 \%}{100 \%} \times 221,65 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 15,92 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,1 \%}{100 \%} \times 0,992 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,95 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa TTegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 218,17 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 13,76 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,8 \%}{100 \%} \times 0,891 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,15 \times 10^{-3} \text{ A}$$

e) Arus beban 1 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,0 \%}{100 \%} \times 221,66 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 19,65 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,8 \%}{100 \%} \times 1,037 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,55 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 221,41 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 14,17 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,0 \%}{100 \%} \times 1,026 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,95 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,7 \%}{100 \%} \times 218,26 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 13,77 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

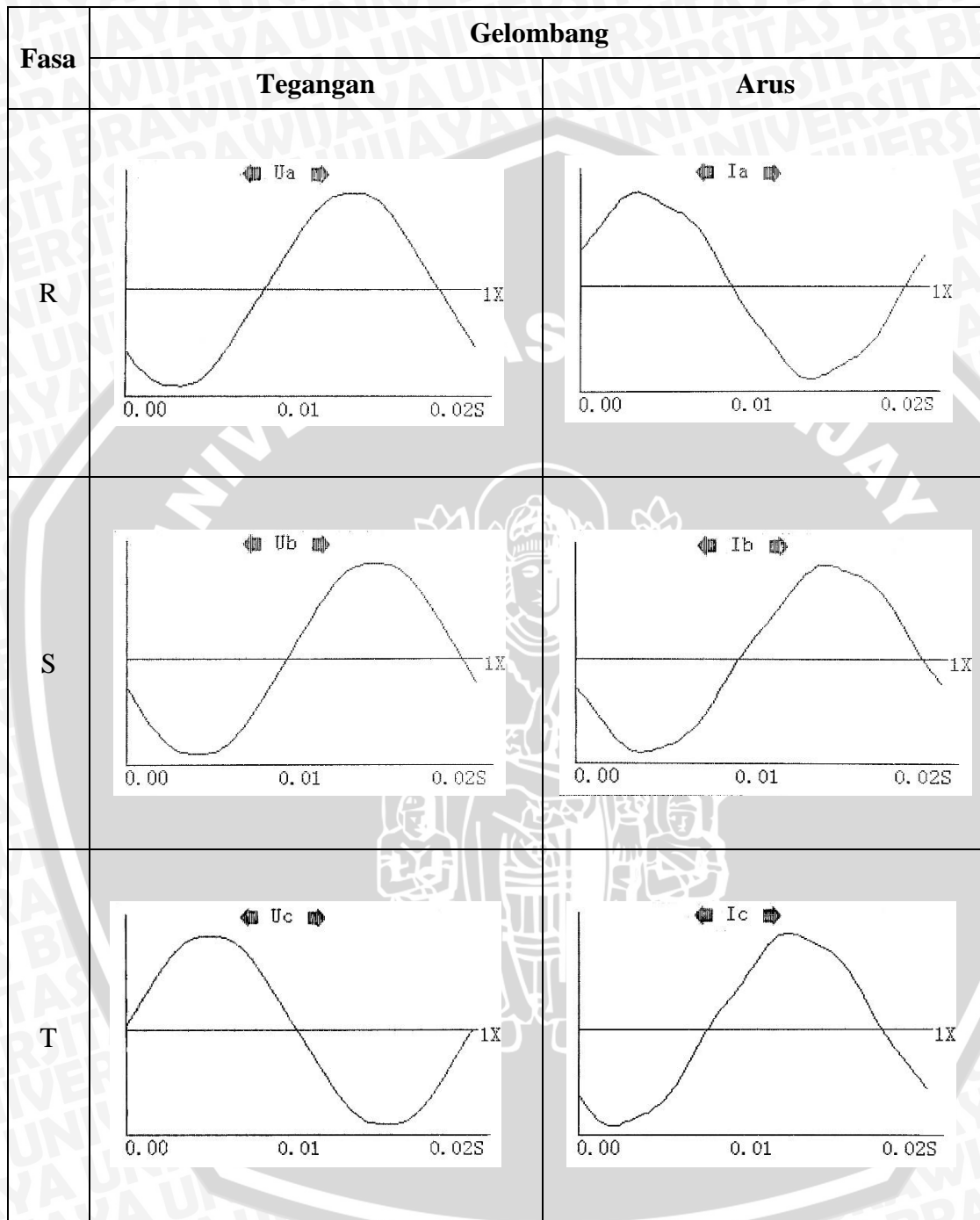
$$3,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,5 \%}{100 \%} \times 0,964 \right]^2$$

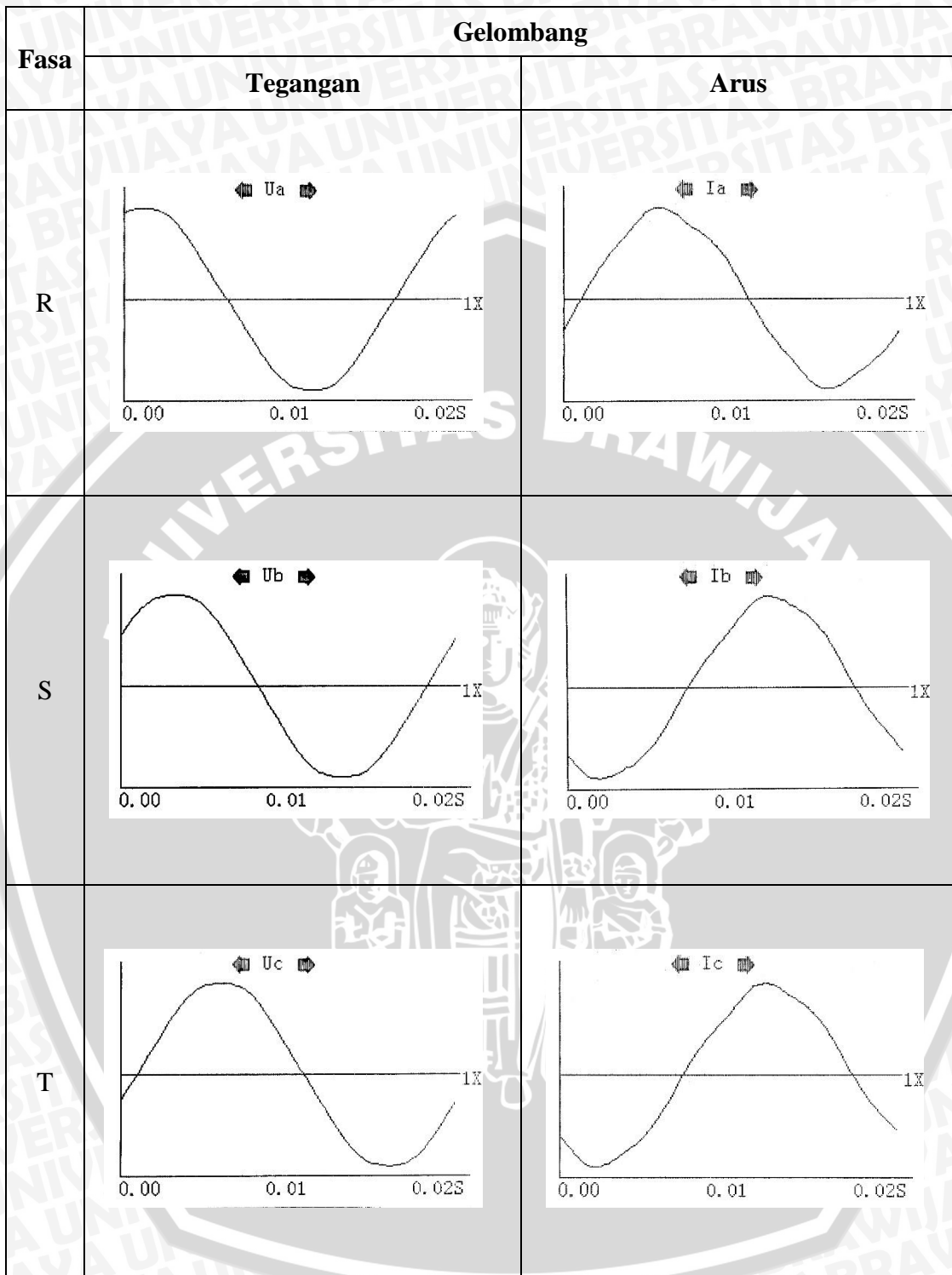
$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Lampiran 3. Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Seimbang

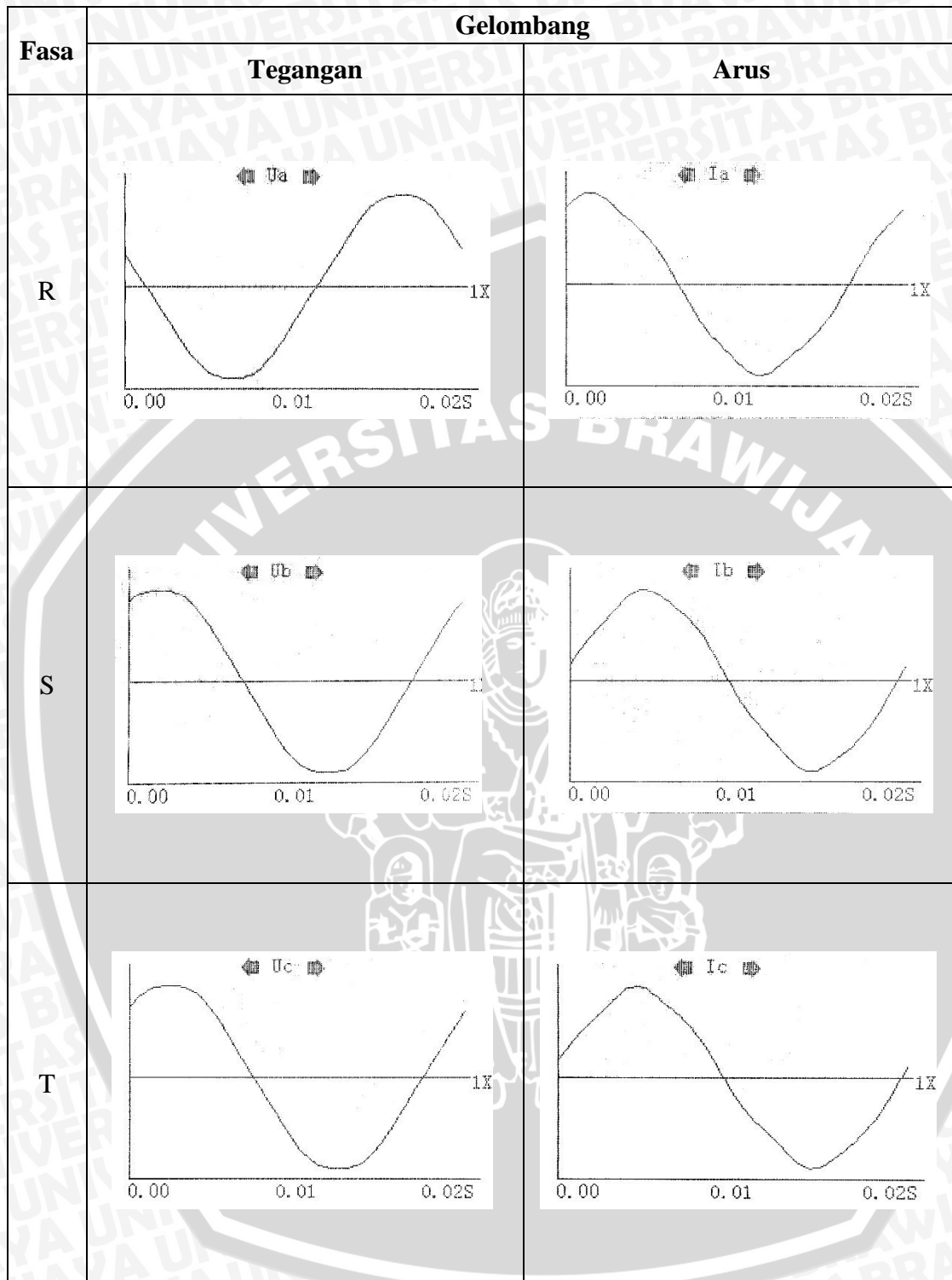
a) Arus Beban 0,8 A



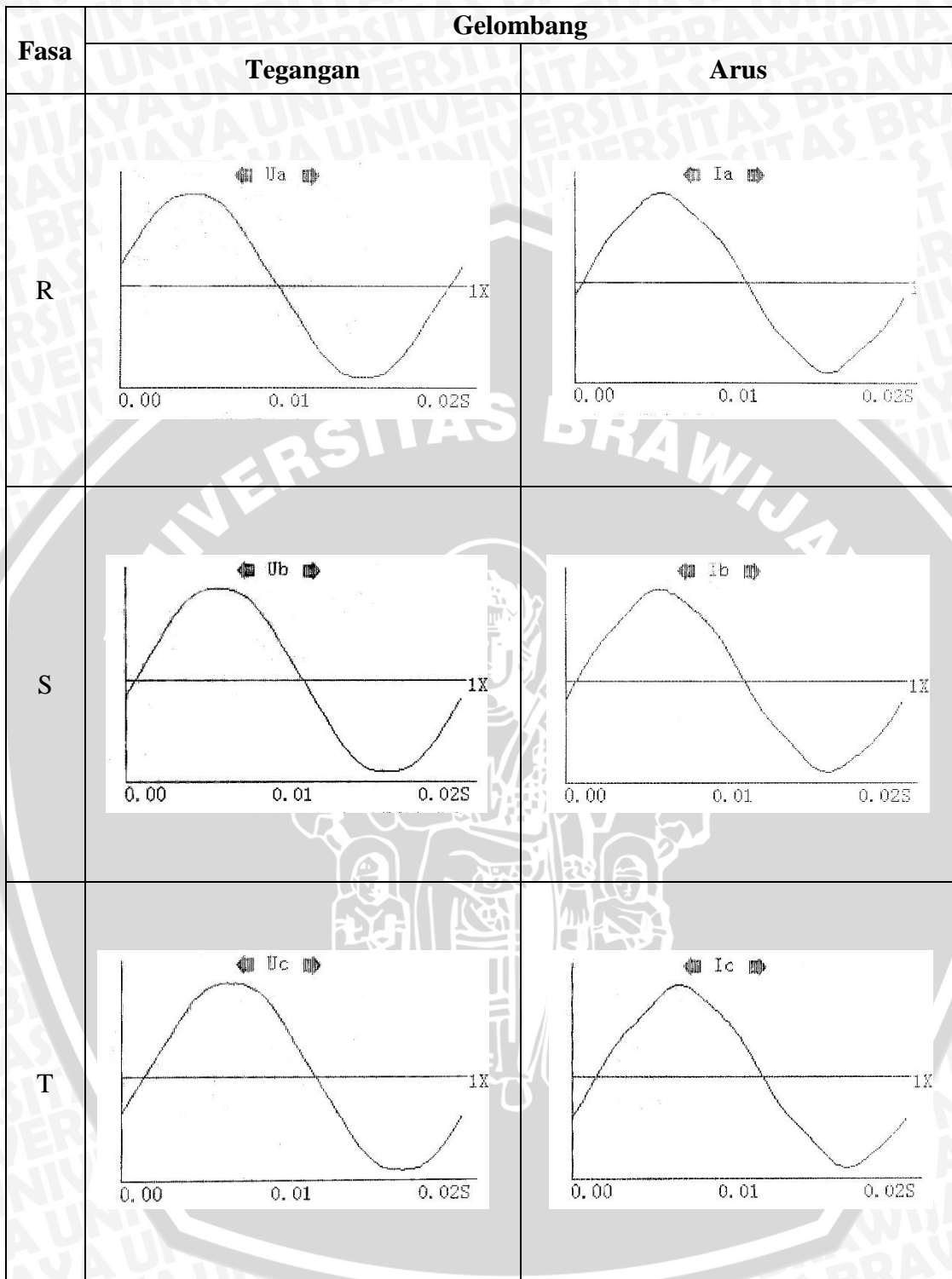
b) Arus Beban 0,85 A



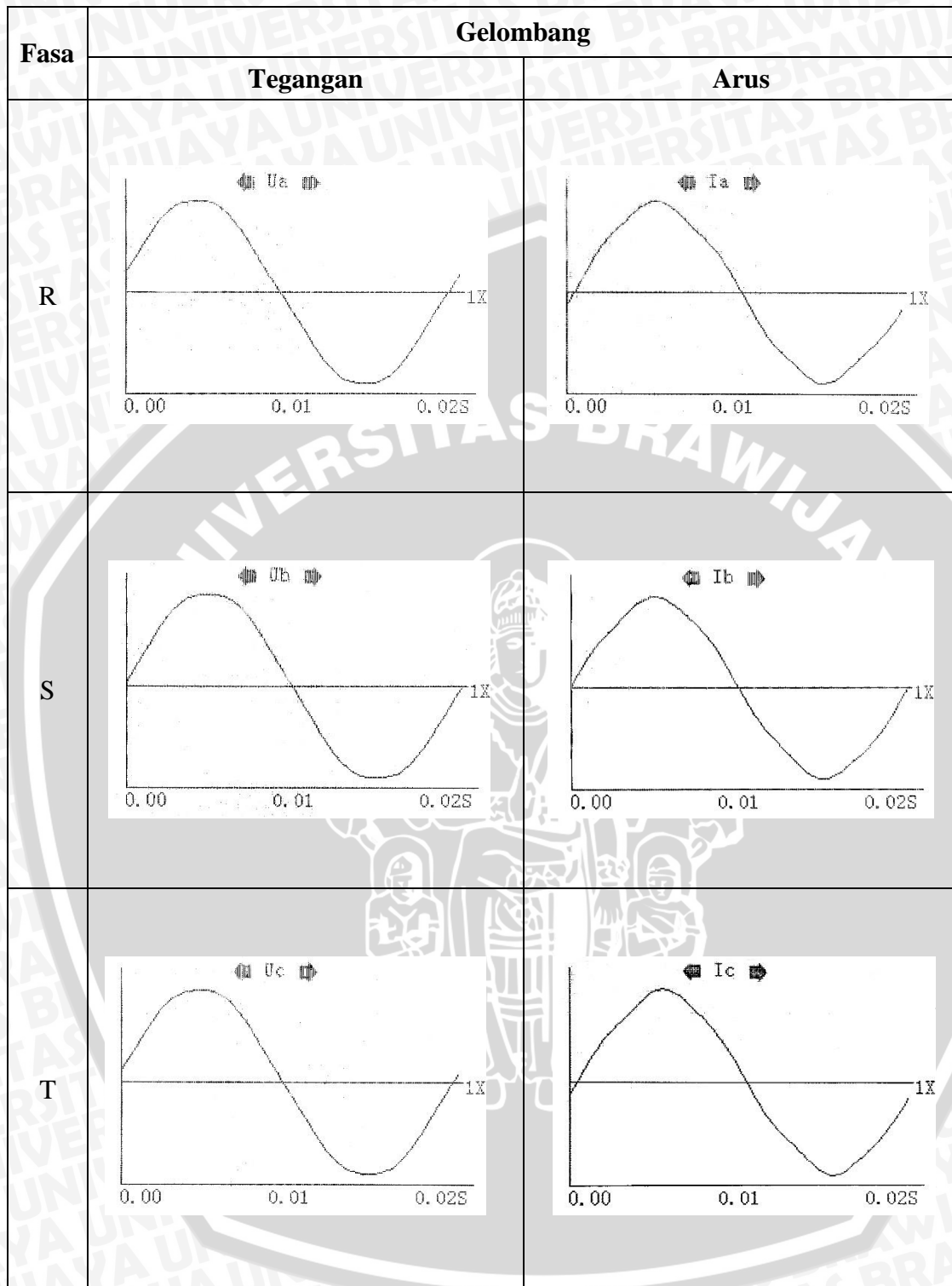
c) Arus Beban 0,90 A



d) Arus Beban 0,95 A



e) Arus Beban 1,00 A



Lampiran 4. Perhitungan Tegangan Harmonisa Total dan Arus Harmonisa Total pada Transformator Hubungan Y-Δ-Y dengan Pembebanan Seimbang

a) Arus beban 0,8 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,9 \%}{100 \%} \times 221,55 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 17,72 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,2 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,2 \%}{100 \%} \times 0,803 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,5 \%}{100 \%} \times 221,64 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 11,05 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,5 \%}{100 \%} \times 0,833 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,85 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,21 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,19 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,1 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,1 \%}{100 \%} \times 0,757 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,96 \times 10^{-3} \text{ A}$$

b) Arus beban 0,85 A**- Fasa R**Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,8 \%}{100 \%} \times 221,45 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 15,89 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$4,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{4,0 \%}{100 \%} \times 0,871 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,21 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa STegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 221,36 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,54 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,3 \%}{100 \%} \times 0,894 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,87 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa TTegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,17 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,19 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,8 \%}{100 \%} \times 0,796 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,91 \times 10^{-3} \text{ A}$$

c) Arus beban 0,9 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,0 \%}{100 \%} \times 221,51 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 19,63 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,7 \%}{100 \%} \times 0,934 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,19 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 221,38 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,55 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,0 \%}{100 \%} \times 0,939 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,79 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,16 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,18 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,8 \%}{100 \%} \times 0,834 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,00 \times 10^{-3} \text{ A}$$

d) Arus beban 0,95 A**- Fasa R**Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,9 \%}{100 \%} \times 221,49 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 17,71 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,7 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,7 \%}{100 \%} \times 0,974 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,30 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa STegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,5 \%}{100 \%} \times 221,57 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 11,05 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,9 \%}{100 \%} \times 0,991 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,83 \times 10^{-3} \text{ A}$$

- Fasa TTegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,27 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,20 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,6 \%}{100 \%} \times 0,886 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,02 \times 10^{-3} \text{ A}$$

e) Arus beban 1 A

– Fasa R

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$2,0 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,0 \%}{100 \%} \times 221,61 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 19,64 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,6 \%}{100 \%} \times 1,030 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,37 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa S

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 221,51 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,56 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$2,8 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{2,8 \%}{100 \%} \times 1,029 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,83 \times 10^{-3} \text{ A}$$

– Fasa T

Tegangan Harmonisa

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1}$$

$$1,6 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{1,6 \%}{100 \%} \times 218,25 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 12,19 \text{ volt}$$

Arus Harmonisa

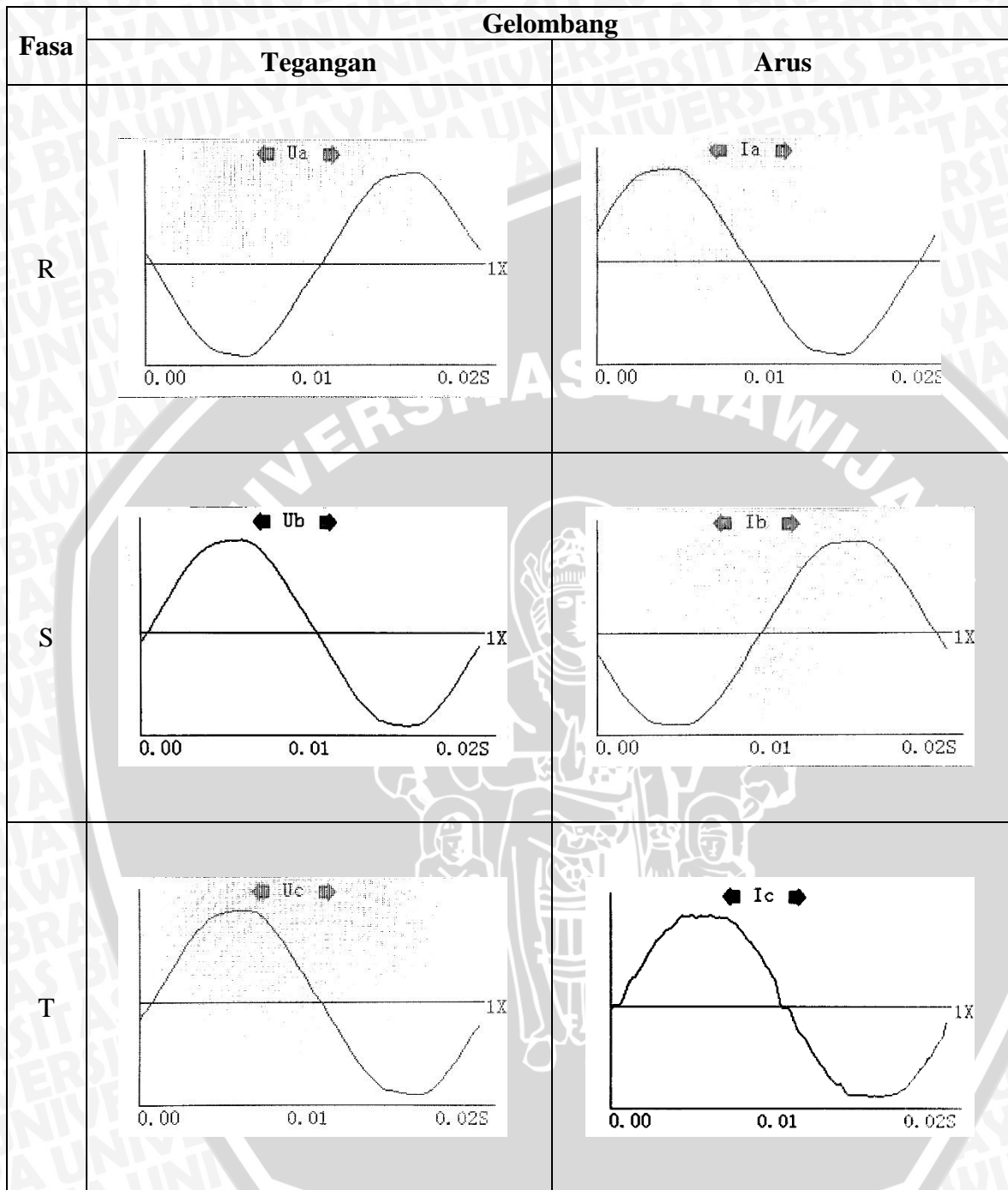
$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$3,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

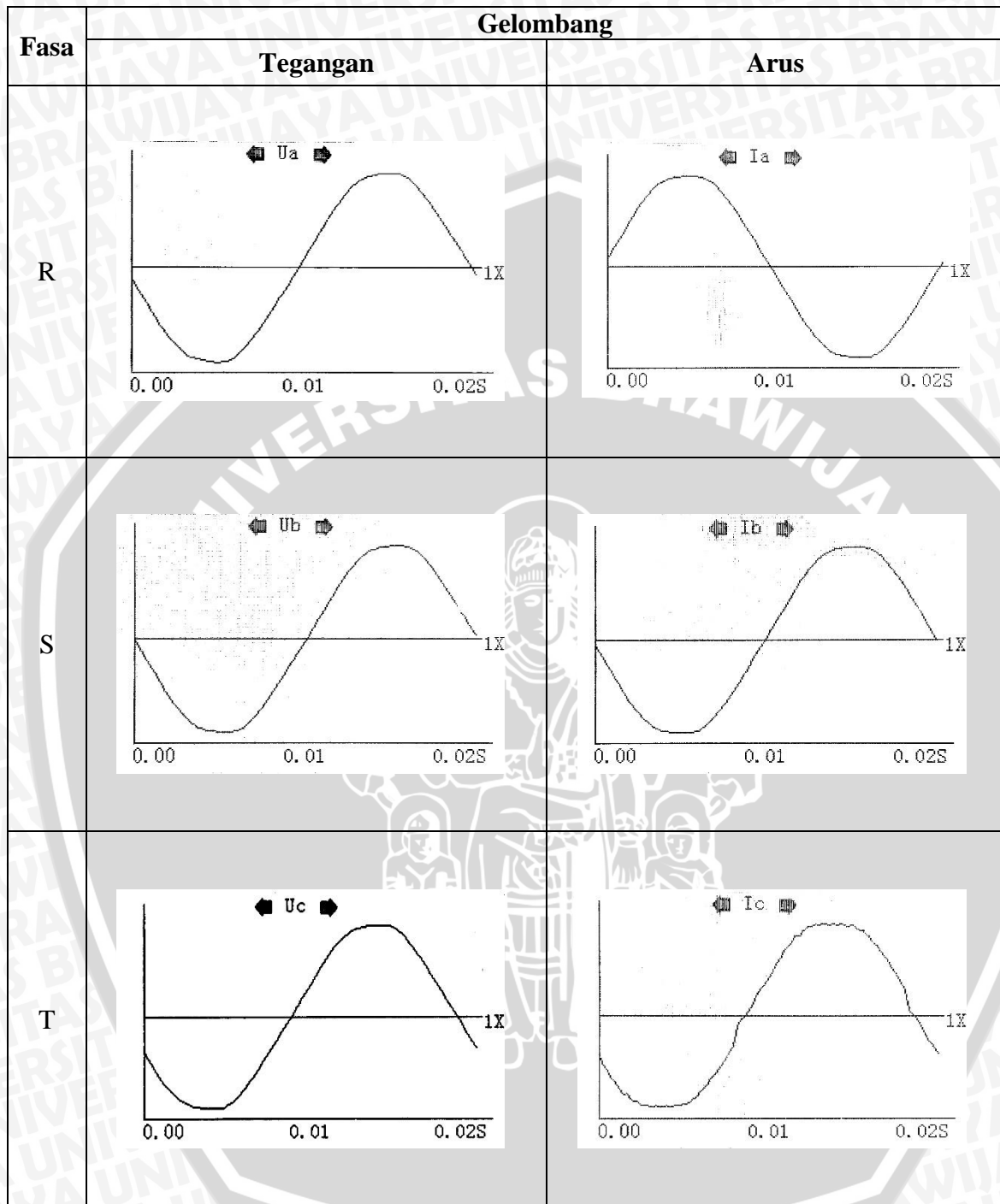
$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{3,4 \%}{100 \%} \times 0,959 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 1,06 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Lampiran 5. Gelombang Tegangan dan Arus pada Transformator Hubungan Y-Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang



Lampiran 6. Gelombang Tegangan dan Arus pada Transformator Hubungan Y- Δ -Y dengan Pembebanan Tidak Seimbang



Lampiran 7. Foto Pengujian

- Pengujian Transformator dengan Pembebanan Seimbang



- Pengujian Transformator dengan Pembebanan Tidak Seimbang

