

Investigasi Kandungan Harmonisa Arus Magnetisasi Inrush Transformator Satu Fase

Weldhi Septian¹, Wahyudi Budi Pramono²

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl Kaliurang KM 14.5 Yogyakarta, Indonesia

¹15524086@students.uui.ac.id

²985240104@uui.ac.id

Abstrak- Transformator merupakan suatu alat kelistrikan yang dapat mengubah tegangan bolak-balik menjadi lebih besar atau lebih kecil. Transformator banyak digunakan dalam sistem kelistrikan seperti pada sistem pembangkit, saluran transmisi, maupun saluran distribusi. Ketika transformator dihubungkan dengan sumber tegangan, maka terdapat lonjakan arus yang berlangsung cepat. Lonjakan arus tersebut disebut arus *inrush*. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut fasa tegangan terhadap besarnya arus *inrush*. Pengujian arus *inrush* dilakukan menggunakan transformator dengan daya 1500 VA, tegangan masukan sebesar 220 V, dan dilakukan pengukuran harmonik arus *inrush* pada sisi primer transformator dalam keadaan tanpa beban dengan variasi masukan sudut fasa tegangan di sudut *axis* (0°, 90°, 180°, 270°, 360°) dan di sudut 30° dan 60°. Hasil pengujian THD arus *inrush* menunjukkan bahwa harmonik arus *inrush* akan bernilai semakin besar dengan membesarnya sudut fasa. Arus *inrush* dominan dengan konten harmonik kedua hingga kelima. Harmonik juga di ukur per siklus. Hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa seiring bertambah nya siklus konten harmonik akan bertambah.

Kata Kunci: Transformator, Arus *Inrush*, Analisis Harmonik.

I. PENDAHULUAN

Trafo atau Transformator merupakan salah satu bagian esensial dari dari suatu sistem tenaga. Sirkuit magnetis merupakan salah satu dari bagian terpenting pada transformator. Sirkuit magnetis terdiri dari inti besi yang berlapis yang membawa flux menuju lilitan. Energi di transfer dari sirkuit listrik ke sirkuit lainnya melewati medan magnet yang di bawa oleh inti.

Sistem yang ideal memiliki suplai listrik dengan sinyal tegangan sinusoidal secara sempurna. Namun, karena berbagai alasan, kondisi secara umum menyimpang dari kondisi yang ideal. Penyimpangan ini dapat disebut dengan harmonisa[1].

Harmonisa pada arus biasanya terjadi jika terdapat beban yang tidak linear dalam sistem distribusi. Beban

dikatakan tidak linear jika tegangan tidak menarik arus dengan dengan bentuk gelombang yang sama.

Performa pada transformator bergantung pada batasan flux magnetis yang dapat dibawa oleh inti transformator. Bahan ferromagnetis hanya bisa membawa flux magnetis dalam densitas tertentu. Inti transformator bisanya bersaturasi saat densitas magnetic flux tertentu, yang berarti penambahan gaya magnet (mmf) tidak menghasilkan peningkatan yang proporsional pada flux magnetis.

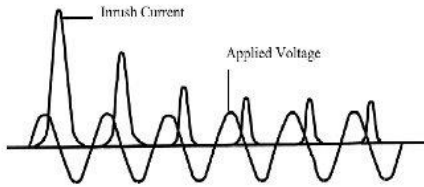
Pada keadaan saturasi, harmonisa dihasilkan di flux atau/dan di intensitas medan magnet. Saat saturasi inti transformator berkerja sebagai sumber arus yang menghasilkan harmonisa, yang akan mengalir langsung ke lilitan primer ataupun sekunder.

Sekarang ini, beban dari transformator sangat terganggu oleh adanya harmonisa. Komponen harmonisa menyebabkan menyebabkan losses pada tranformator meningkat, bahkan dapat membuat transformator tidak dapat beroperasi[2].

II. STUDI LITERATUR

Harmonisa pada transformator sudah diselidiki sebelumnya oleh Ismail Daut dkk[3]. Mereka menggunakan transformer tipe core yang dihubungkan dengan variable voltage variable frequency(VVVF) sebagai sumber dan menggunakan variable kerapatan fluks magnetik. Mereka mendapatkan bahwa arus magnetik dan kandungan harmonisa meningkat ketika fluks magnetik yang besar di arahkan dan sebaliknya dengan faktor daya yang berkurang. Hal ini menunjukkan saturasi dari tranformator tersebut. I. Daut [3] membahas pertimbangan penting, yaitu mengevaluasi dampak harmonik dan pengaruhnya terhadap komponen dan beban sistem tenaga. Transformer adalah komponen utama dalam sistem tenaga. Peningkatan kerugian karena distorsi harmonik dapat menyebabkan kehilangan daya yang berlebihan dan karenanya kenaikan suhu abnormal. Studi ini menyajikan efek distorsi harmonik arus beban dan tegangan pada rugi trafo fase tunggal, memanfaatkan pengukuran on-line (pemantauan) metode dari sisi primer. Trafo dimuati dengan pengontrol kecepatan SCR yang terdiri dari penyearah jembatan penuh fase tunggal, SCR dan beban resisten untuk menghasilkan berbagai distorsi arus dan tegangan total harmonik (THDi dan THDv).

Arus inrush dalam transformator dihasilkan dari perubahan mendadak dari tegangan magnetisasi. Arus transformator ini dapat disebabkan oleh pemberian energi pada transformator tanpa beban, terjadinya gangguan eksternal, pemulihan tegangan setelah membersihkan gangguan eksternal dan sinkronisasi fase-keluar dari generator yang terhubung. Karena amplitudo arus masuk dapat setinggi arus hubung singkat, analisis terperinci dari arus masuk magnetisasi dalam berbagai kondisi diperlukan untuk masalah sistem pelindung transformator[4].



Gambar 2.1 Pola arus *inrush*[5]

Besar arus inrush mencapai hingga 8-10 kali arus beban penuh, bergantung pada banyak hal. Faktor utama yang mempengaruhi arus inrush adalah fluks sisa dan impedansi rangkaian[6].

Berdasarkan standar IEEE 519. 1992, terdapat dua kriteria untuk mengevaluasi harmonisa, Yaitu batasan untuk harmonisa arus dan batasan harmonisa tegangan. Berikut adalah tabel batasan harmonisa untuk sistem lebih dari 120 V hingga 69 kV.

Tabel 2.1 Standar Harmonisa Arus[7]

I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<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	76.0	2.5	1.4	20.0

THD tegangan dan arus :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}; THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

(Error! No text of specified style in document..3)

V_h ; I_h = komponen harmonisa.
 V_1 ; I_1 = komponen fundamental

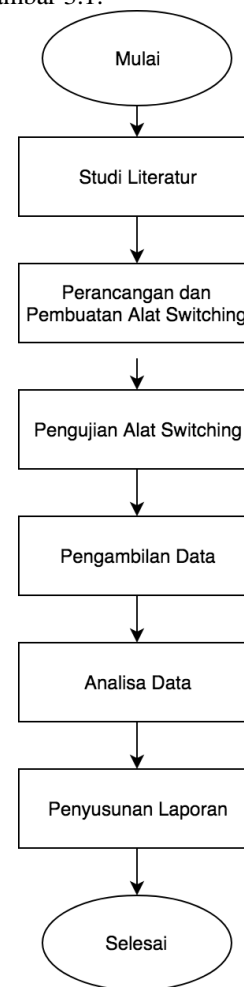
Arus *inrush* umumnya kaya akan harmonik, khususnya harmonik kedua. Kandungan harmonik kedua pada arus *inrush* umumnya digunakan pada diferensial arus untu diferensial elemen transformer untuk memblokade atau pun meningkatkan batasan saat kondisi *inrush*[8].

Tabel 2.2 Harmonic Content of Inrush Current [19]

Harmonic order	Magnitude (%)
Fundamental	100%
DC	40 to 60%
2nd	30 to 70%
3rd	30 to 50%

III. METODE PENELITIAN

Alur penelitian diuraikan dalam diagram alir (*flow chart*) seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 1 Alur Penelitian

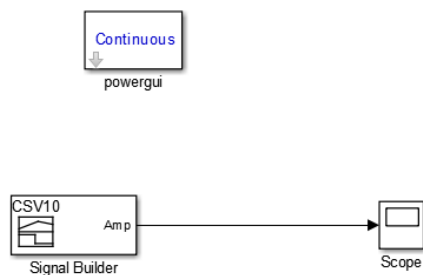
TABEL 3 DATASHEET TRANSFORMATOR

No	Data	Nilai
1	Input Voltage (V_m)	220 V
2	Output Voltage (V_o)	220 V
3	Output Current (I_o)	0,5 A
4	Daya (S)	1500 VA
5	Frequency (f)	50 Hz
6	Resistansi Primer (R_p)	0,58 Ω
7	Resistansi Sekunder (R_s)	0,71 Ω
8	Induktansi Primer (L_p)	0,226 H
9	Induktansi Sekunder (L_s)	0,278 H
10	Jumlah Lilitan Primer (N_p)	154
11	Jumlah Lilitan Primer (N_s)	169
12	Luas Penampang Inti (A)	11,125 cm \times 5,7 cm

IV. HASIL DAN ANALISA

Pengujian arus *inrush* dilakukan dengan variasi pengambilan data di sudut *axis* 0° , 90° , 180° , 270° dan di sudut *non-axis* 30° dan 60° . Pengukuran arus *inrush* dilakukan pada transformator tanpa beban selama 1 detik dengan jumlah sampling sebanyak 10.000 sampling data. Data tersebut kemudian disaring lagi menggunakan *eye test* sehingga data yang akan diolah dengan regresi linear dipotong hingga 400 ms. Data sampling dari pengukuran arus *inrush* akan secara otomatis tersimpan pada excel dan data tersebut akan dimasukkan kedalam grafik.

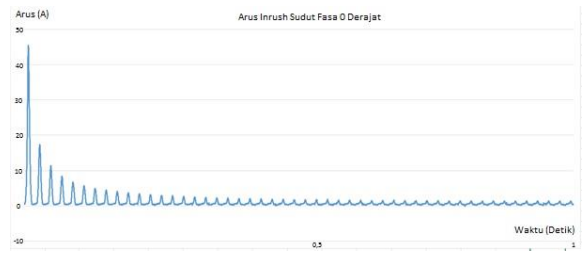
Regresi Linear digunakan untuk mengolah data yang awalnya berbasis 5 V (berdasarkan tegangan maksimum Arduino) menjadi data *real-time*.



GAMBAR ERROR! NO TEXT OF SPECIFIED STYLE IN DOCUMENT..2
HASIL PENGUKURAN ARUS INRUSH SUDUT FASA 0°

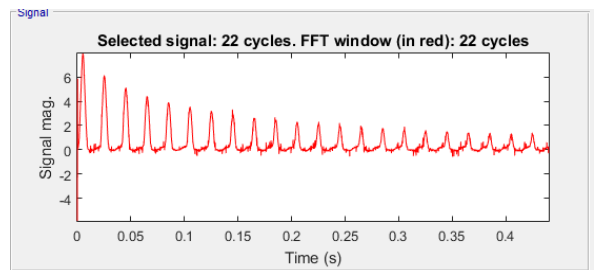
Dengan menggunakan Simulink oleh Matlab, kita mengaplikasikan FFT terhadap data hasil pengukuran inrush. Data hasil pengukuran berada dalam file dalam bentuk .csv. Bentuk file ini akan memudahkan kita untuk memasukkan data dalam variabel matlab. Variabel ini akan diolah oleh *block* powergui yang ada di Simulink. Powergui ini akan

mengimplementasikan FFT terhadap data secara *continuous* dan menggunakan metode numerik bogacki-shampine. Berikut adalah model dari Simulink yang dipakai untuk mengolah data.

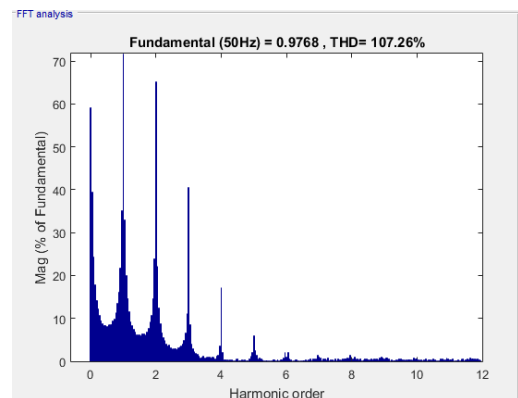


GAMBAR ERROR! NO TEXT OF SPECIFIED STYLE IN DOCUMENT..5 MODEL SIMULINK UNTUK PENGOLAHAN DATA.

Data yang akan diolah oleh model Simulink ini adalah data arus inrush dengan sudut 0° , 90° , 180° , dan 270° . Data yang diambil dalam rentang waktu 0,44 detik atau sebanyak 22 siklus yang diambil berdasarkan *eye-test* saat melihat gelombang *inrush* sebelum di olah di matlab. Data tersebut juga akan dibagi per 1 *cycle* sebanyak 10 *cycle* agar kita dapat memahami magnitudo harmonik tersebut terhadap amplituda gelombang fundamental dari arus inrush yang diselidiki.



GAMBAR 4.6 FFT WINDOW DENGAN SUDUT FASA 0° .

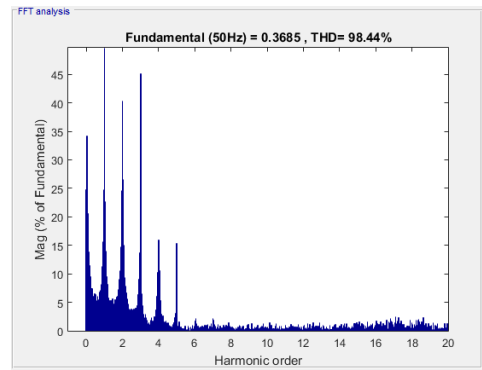


GAMBAR 4.7 HARMONIK ARUS INRUSH DENGAN SUDUT FASA 0° .

Gambar 4.6 diatas merupakan grafik magnitudo harmonik terhadap gelombang fundamental. Harmonik yang ditunjukkan adalah komponen dc hingga harmonik ke-20.

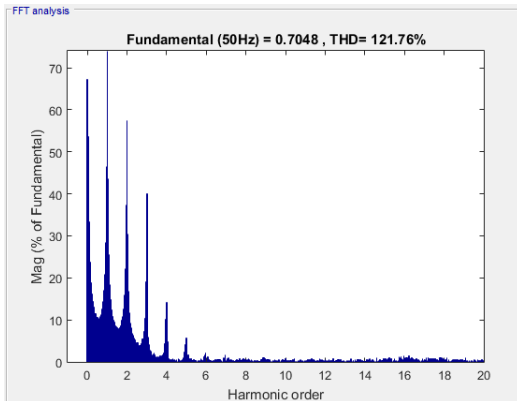
Selain itu grafik tersebut juga menunjukkan sub-harmonik yang merupakan $1/n$ dari gelombang fundamental.

Besaran dari harmonik yang ditunjukkan di gambar 4.6 berdasarkan rata-rata dari besaran gelombang fundamental yang sebesar 0,9768 ini berdasarkan Dengan menggunakan sudut *switch-on* 0° , kandung harmonik dalam arus *inrush* kaya akan harmonik kedua, ketiga, keempat, dan kelima. Semua komponen harmonic tersebut memiliki magnitudo diatas 5 %. Komponen DC arus inrush cukup besar, melihat banyaknya fluktuasi yang terjadi pada arus *inrush*. Hal ini dimungkinkan oleh banyaknya komponen yang tidak termasuk pada harmonic dengan frekuensi tertentu.



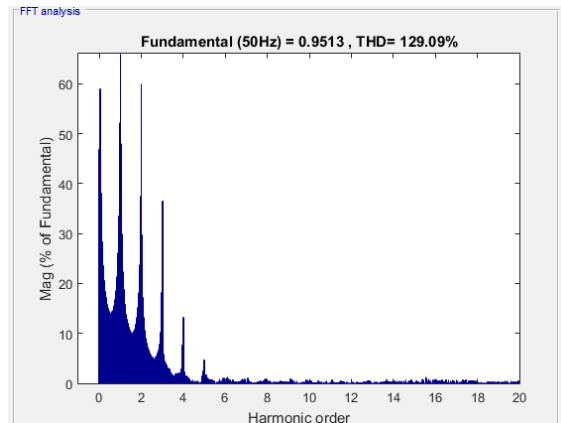
GAMBAR 4.10 HARMONIK ARUS INRUSH DENGAN SUDUT FASA 90° .

Gelombang dengan sudut 90° merupakan gelombang dengan THD terkecil. Terlihat bahwa kandung harmonik kedua dari gelombang ini di sekitaran 40%, berbeda dengan sudut fasa lainnya yang berada pada kisaran 60%.



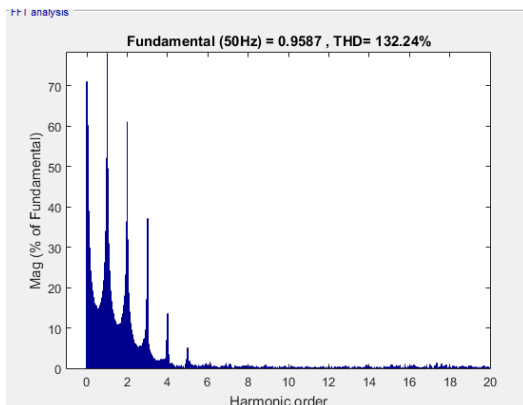
GAMBAR 4.8 HARMONIK ARUS INRUSH DENGAN SUDUT FASA 30° .

Tidak terjadi banyak perubahan di harmonik dominan (harmonik pertama hingga kelima). Total distorsi Harmonik bertambah hingga $\pm 14\%$



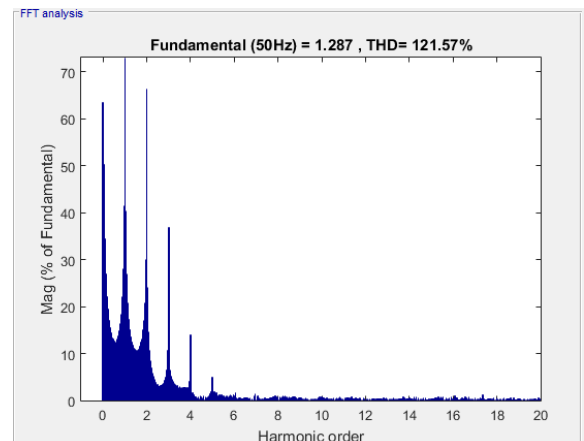
GAMBAR ERROR! NO TEXT OF SPECIFIED STYLE IN DOCUMENT..11
HARMONIK ARUS INRUSH DENGAN SUDUT FASA 180°

Pada sudut *axis* dengan naiknya besar sudut fasa maka konten hamonik akan bertambah. Terlihat di gelombang dengan sudut fasa 180° di gambar 4.10 bahwa konten harmonik di sudut ini lebih besar dari sudut 0° dan 90° .



GAMBAR ERROR! NO TEXT OF SPECIFIED STYLE IN DOCUMENT..9

Total distorsi harmonik yang ada pada 60° lebih besar dari sudut 0° dan 30° . Meskipun harmonik dominan tidak terjadi banyak perubahan, namun THD dari gelombang tersebut bertambah hingga 10% dari gelombang dengan sudut fase 30°



GAMBAR 4 ERROR! NO TEXT OF SPECIFIED STYLE IN DOCUMENT..12 HARMONIK ARUS INRUSH DENGAN SUDUT FASA

Dengan naiknya sudut *switch-on*, THD terlihat bertambah. Meskipun harmonik terbesarnya (harmonik kedua hingga kelima) terlihat tidak terjadi banyak perubahan, Terdapat perubahan yang cukup besar pada THD arus *inrush* tersebut, yaitu sebesar 7%.

TABEL Error! No text of specified style in document..1 HASIL PENGUJIAN MAGNITUDO HARMONIK ARUS *INRUSH* DENGAN KONDISI TANPA BEBAN DAN BERBAGAI MACAM SUDUT *SWITCH ON*

Sudut	Magnitudo Harmonik Arus Inrush (%)											THD	Fund
	DC	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th		
0°	59.21	65.25	40.59	17.17	5.86	1.08	1.04	0.07	0.57	0.48	0.29	107.2	0.977
30°	67.29	57.46	39.96	14.25	5.70	0.01	0.33	0.63	0.33	0.84	0.28	121.6	0.705
60°	71.09	61.08	37.13	13.44	5.16	0.46	0.40	0.08	0.30	0.23	0.34	132.4	0.958
90°	24.70	40.35	45.15	15.88	15.3	1.79	2.18	0.61	0.37	0.46	0.99	98.44	0.368
180°	46.91	60.04	36.60	13.20	4.63	0.35	0.30	0.49	0.12	0.43	0.29	129.1	0.951
270°	63.40	66.44	36.92	14.07	4.98	1.10	0.15	0.76	0.48	0.80	0.12	121.5	1.287

TABEL 4.2 HASIL PENGUJIAN SUDUT FASA HARMONIK ARUS *INRUSH* DENGAN KONDISI TANPA BEBAN DAN BERBAGAI MACAM SUDUT *SWITCH ON*

Sudut	Sudut Fase Harmonik Arus Inrush (°)										
	Fund	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th
0°	2.9	261.4	169.9	77.1	-7.7	-36.6	-59.1	65.2	-18.8	-51.4	247.2
30°	36.1	143.4	260.0	14.6	116.8	58.4	-53.4	261.4	-84.7	61.1	74.7
60°	57.4	190.6	-27.0	112.1	254.9	83.7	158.6	14.5	14.1	199.61	30.0
90°	103.2	253.6	74.7	237.7	58.8	206.0	43.6	33.4	243.1	114.9	261.3
180°	177.1	70.2	-29.6	229.5	118.9	70.1	249.8	-22.90	248.9	169.1	-83.5
270°	268.4	78.7	251.4	73.64	239.5	1142.0	167.0	156.6	149.0	199.9	186.4

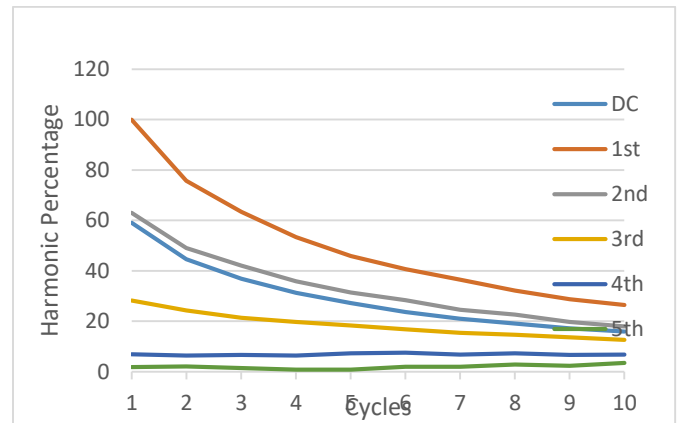
Tabel 4.1 menunjukkan konten harmonik yang terkandung dalam arus *inrush*. Ditemukan bahwa konten harmonik kaya oleh komponen DC, harmonik kedua, ketiga, keempat, dan kelima. Komponen harmonik lainnya berada dibawah 5 %,.. Dengan berbagai sudut *switch-on* (0°, 90°, 180°, dan 270°), konten harmonik ditemukan ikut meningkat ketika sudut *switch-on* ~ meningkat, kecuali untuk untuk sudut *switch on* 90°. Sudut 90° derajat memiliki THD yang paling kecil. Pada umumnya harmonik kedua memiliki magnitudo sebesar ±60% kecuali pada sudut *switch-on* 90°. Pada sudut ini konten harmonik kedua adalah 40%. Harmonik ketiga setiap sudut memiliki magnitudo sebesar 35 % hingga 45%. Konten Harmonik ketiga dengan magnitudo sebesar 13%-17%. Harmonik kelima rata-rata memiliki magnitudo sebesar 5 %, kecuali disudut 90° dengan magnitudo sebesar 15%.

Harmonik kedua, dengan arus diferensial, dapat digunakan untuk mebatasi arus pada kondisi *inrush*[18]. Dilihat dari tabel 4.1, harmonik kedua dengan sudut fasa 90° merupakan harmonik kedua dengan magnitudo terkecil. Dengan menggunakan sudut fasa ini, kita bisa melakukan mitigasi arus *inrush*.

Perubahan sudut fasa juga terjadi di seluruh komponen harmonik dari arus *inrush*. Saat harmonik diinvestigasi persiklus, Sudut fasa pada saat *switch-on*, sesuai dengan sudut fasa yang ditampilkan oleh matlab. Perubahan sudut fasa terjadi secara acak meskipun besaran dari harmonik itu sendiri akan mempengaruhi sudut fasa seperti yang akan

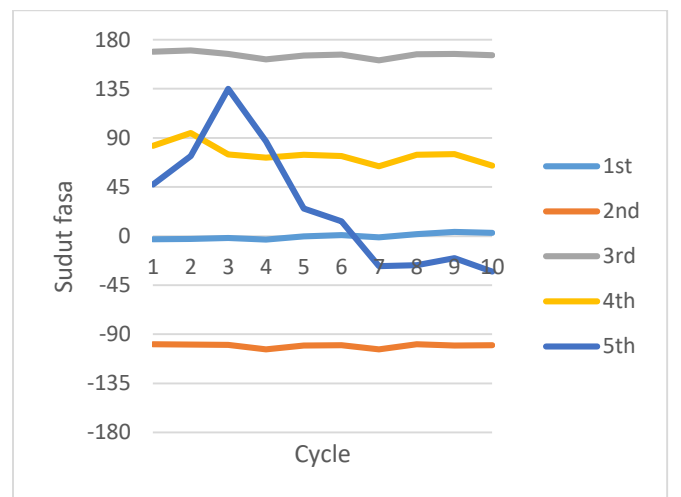
ditunjukkan di sub bab dibawah ini. Pergeseran sudut fasa ini terjadi disebabkan oleh gelombang harmonik dengan sudut fasa yang berbeda.

Magnitudo dari komponen gelombang harmonik bergantung pada *peak* dari gelombang fundamental nya Dengan *peak* gelombang *inrush* yang berubah tiap siklusnya, maka investigasi komponen harmonik tiap siklus diperlukan. Harmonik dihitung hingga ke siklus ke-10, melihat arus *inrush* sudah sangat berkurang setelah siklus ke-10 ini. Konten harmonik kedua dalam arus diferensial juga digunakan dalam elemen diferensial transformator untuk memblokir dan pengendalian selama kondisi *inrush*.



GAMBAR 4.12 GRAFIK PERUBAHAN MAGNITUDO HARMONIK SAMPAI HARMONIK KELIMA TIAP CYCLE DI SUDUT *SWITCH-ON* 0°

Komponen harmonik menunjukkan peningkatan dari satu siklus menuju siklus selanjutnya seiring dengan berkurangnya magnitudo arus *inrush* itu sendiri. Hal ini menunjukkan bahwa faktor utama yang mempengaruhi komponen harmonik di transformator satu fasa ini bukan arus *inrush*, melainkan arus listrik yang menjadi sumber transformator tersebut memiliki konten harmonik yang besar.



GAMBAR 4.13 GRAFIK PERUBAHAN SUDUT FASA SAMPAI HARMONIK KELIMA TIAP CYCLE DI SUDUT *SWITCH-ON* 0°

Sudut fasa untuk gelombang fundamental dan harmonik kedua hingga keempat pada umumnya terus naik seiring dengan perubahan siklus. Namun pada komponen harmonik ke-5 terjadi perubahan sudut fasa yang besar dikarenakan komponen harmonik kelima ini memiliki frekuensi yang sangat besar, sehingga saat terjadi perubahan siklus setelah 0,02 sekon (50 Hz) margin perubahan fasa menjadi berganda.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Arus *Inrush* kaya akan komponen harmonic kedua, ketiga, dan keempat, dengan harmonic kedua yang paling dominan.
2. Pada sudut *non-axis*, membesarnya sudut *switch-on*, akan menyebabkan THD pada arus *inrush* semakin besar. THD ini kemudian akan menurun kembali di sudut *axis*. Membesarnya sudut *axis* ini akan menyebabkan THD akan membesar juga.
3. Terjadi *decay* pada magnitude harmonik seiring dengan waktu hingga mencapai dibawah 20% di silus kesepuluh.
4. Perubahan sudut fasa terjadi seiring berlanjutnya siklus gelombang tersebut.
5. Dengan bertambahnya siklus dan berkurangnya magnitudo arus fundamental, maka persentase magnitudo komponen harmonic bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa sumber utama dari harmonik tersebut bukan arus *inrush*, melainkan sumber arus transformator tersebut.

Setelah melakukan penelitian ini, penulis memiliki beberapa saran untuk penelitian selanjutnya agar mampu mendapatkan hasil yang maksimal, yaitu:

1. Menggunakan mikrokontroler yang dapat memberi *delay* dengan presisi/ tepat karena ketepatan *delay* sangat dibutuhkan agar didapatkan nilai arus *inrush* yang sesuai dengan sudut fasa tegangan yang telah diatur pada mikrokontroler.
2. Program atau komponen dari alat tersebut dapat membedakan antara *zero crossing* sudut $0^\circ/360^\circ$ dengan *zero crossing* sudut 180° .
3. Pengambilan data dilkakukan dengan lingkungan terkontrol, sehingga terdapat perbandingan antara komponen harmonic dari arus *inrush* itu sendiri dan hamonik dari arus sumber.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. De La rosa, *Harmonics and Power Systems*, vol. 13. CRC Press, 2006.
- [2] M. Mirzaie, M. Yazdani-Asrami, S. M. B. Sadati, and A. Shayegani Akmal, "Impacts of non-sinusoidal load currents on distribution transformer losses-Part I: Theoretical aspects and finite element based simulation," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 2207–2214, 2011.
- [3] N. Chiesa and H. K. Høidalen, "Hysteretic iron-core inductor for transformer inrush current modelling in emtp," *16th Power Syst. Comput. Conf.*, pp. 1–7, 2008.
- [4] I. Daut, S. Hasan, and S. Taib, "Magnetizing Current, Harmonic Content and Power Factor as the Indicators of Transformer Core Saturation," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 304–307, 2013.
- [5] Alexander Kusko; Marc T.Thompson, "Power Quality in Electrical System," in *Aging*, 2015.
- [6] A. Baggini and Z. Hanzelka, "Voltage and Current Harmonics," in *Handbook of Power Quality*, 2008.
- [7] E. Fuchs, "Quality: Theory and Practice," *AT&T Tech. J.*, 1986.
- [8] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, and M. J. Samotyj, "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1995.
- [9] N. Pjevalica, N. Petrovic, V. Pjevalica, N. Teslic, and T. P. Section, "Experimental Detection of Transformer Excitation Asymmetry through the Analysis of the Magnetizing Current Harmonic Content," 2016.
- [10] W. M. Grady and S. Santoso, "Understanding power system harmonics," *IEEE Power Eng. Rev.*, 2001.
- [11] K. (Károly) Karsai, D. (Dénes) Kerényi, and L. Kiss, *Large power transformers*. Amsterdam ;;New York ;;New York, NY, U.S.A. : Elsevier, 1987.
- [12] H. C. Seo and C. H. Kim, "The analysis of power quality effects from the transformer inrush current: A case study of the Jeju power system, Korea," in *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, PES, 2008.
- [13] A. Baggini, *Handbook of Power Quality*. 2008.
- [14] Julius Sentosa Setiadji1, Tabrani Machmudsyah, and Yohanes Cipta Wijaya3, "Pengaruh Harmonisa Pada Gardu Trafo Tiang Daya 100 kVA di PLN APJ Surabaya Selatan," *J. Tek. Elektro*, 2007.
- [15] J. A. and N. R. Watson, *Power system harmonics*. 2015.
- [16] U. A. Bakshi and M. V Bakshi, *Magnetic Circuits and Transformers*. Technical Publications, 2008.
- [17] D. Hansen, "PacifiCorp's application of IEEE 1453," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, PES, 2007.
- [18] S. Hodder, B. Kasztenny, N. Fischer, and Y. Xia, "Low second-harmonic content in transformer inrush currents - Analysis and practical solutions for protection security," *2014 67th Annu. Conf. Prot. Relay Eng. CPRE 2014*, pp. 705–722, 2014.
- [19] A. K. Al-Khalifah and E. F. El-Saadany, "Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer," in *LESCOPE'06: 2006 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering - Conference Proceedings*, 2007.
- [20] F. E. Daum, "Nonlinear Filters," in *Encyclopedia of Systems and Control*, 2015.