

**Adri Senen, Oktaria Handayani, dan Christine Widyastuti**

Penambahan Gardu Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan GUI Matlab di Wilayah Tangerang

**Ni Putu Indah Yuliana, Fransiska Moi, dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni**

Aplikasi Metode HIRARC dan Domino untuk *Risk Assessment* Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Proyek Pengendali Banjir Tukad Unda di Wilayah Kabupaten Klungkung

**M. Reza Hidayat, Aditya Febryana, Nivika Tiffany Somantri, dan Yussi Perdana Saputera**

Antena Helix Mode Axial untuk Frekuensi Kerja Radar *S-Band*

**Hasna Satya Dini dan Rizki Pratama Putra**

Pengaturan Parameter *Power System Stabilizer* pada Pembangkit di Sistem IEEE 39 Bus

**Christiono, Miftahul Fikri, Iwa Garniwa MK, Kartika Tresya Mauriraya**

Analisis Variabel Perubahan Suhu Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Dielektrik Udara

**Luluk Kristanto, Sumargo, dan Muhammad Iqbal**

Analisis Kekuatan Struktur Pasca *Retrofitting* pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang

**Gugum Gumilar dan Tarsisius Kristyadi**

Simulasi Perpindahan Panas pada Pipa *Secondary Super Heater* (SSH) PLTU 600 MW dengan CFD

**Rifqi Al Hakim dan Herry Oktadinata**

Analisis Kegagalan pada Komponen Work Roll Setelah Perlakuan Panas

**Faiprianda Assyari Rahmatullah, Rafly Yose Putra, Muhammad Iwan Fermi, Hari Ronaldo**

Perancangan Sistem Pengukuran, Pengendalian, dan Akuisisi Data Menggunakan Arduino dengan Antarmuka WinForms. Studi Kasus: Temperatur

**Giri Angga Setia, Een Taryana, Naufal Nur Aiman, Ahmad Daelami, dan Hikmah Prasetya**

Studi Kejenuhan pada *Current Transformer* (CT) Akibat Arus Hubung Singkat

## TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Managing Editor : • Dr. Hendriyana, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57189732631)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Fitri Hadiyah, S.T., M.T., IPM  
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- Dr. Iris Mahani, S.T., M.T.  
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57197848218)
- Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Sinta ID : 133135)
- Editor : • Dede Irawan Saputra, S.Pd., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57215833890)
- Giri Angga Setia, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57194215122)
- Hajjar Yuliana, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57194007789)
- Pawawoi, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 56545755100)
- Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)
- Andini Hizbiyati, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani)
- Andri Rahmat Kumalasian Nasution, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani)
- Tiara Ariani Putri, S.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani)
-

**Penerbit :**  
**Fakultas Teknik**  
**Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Bandung)**  
Jl. Terusan Gatot Subroto Tromol Pos 807  
Bandung – Jawa Barat  
Indonesia  
40285  
Telp. : 022-731-2741

**Fakultas Teknik**  
**Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Cimahi)**  
Jl. Terusan Jenderal Sudirman P.O. Box 148  
Cimahi – Jawa Barat  
Indonesia  
40531  
Telp. : 022-665-4572  
022-664-3006

**Jurnal Teknik** merupakan **jurnal *peer-reviewed*** dalam **Bahasa Indonesia** di bidang keteknikan yang terbit **2 kali dalam setahun**. Terbit di bulan **Mei** dan **November** sejak tahun 2001. Jurnal Teknik versi online baru terbit pada tahun 2017 dengan fasilitas pengumpulan dan penerbitan online yang berbasis **Open Access Journal** dan mengikuti [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Harga Berlangganan	: Institusi	Rp. 170.000,-/tahun
	Individu	Rp. 160.000,-/tahun
Harga Tidak Berlangganan	: Rp.	100.000,-/nomor

## MITRA BESTARI

Anggota Tim Mitra Bestari Jurnal Teknik Tahun 2023

- Reviewers :
- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 6506054959]
  - Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM. (Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 15128239500]
  - Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S. (Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 43461203000]
  - Prof. I. N. Suprpta Winaya, S.T., M.A.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana, Indonesia) [SCOPUS ID: 18635759300]
  - Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg. (Politeknik Negeri Bali, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189864100] \*
  - Dr. Arief Nur Pratomo, S.T., M.T. (Universitas Pertahanan, Indonesia) [SCOPUS ID: 57216756313] \*
  - Dr. Asep Najmurrokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55919091000]
  - Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M. (Universitas Katholik Parahyangan) [SCOPUS ID: 23975188900]
  - Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103] [ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
  - Dr.Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng. (Institut Teknologi Bandung) [SCOPUS ID: 25638780900]
  - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T. (Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 56688583600]
  - Dr. Eng. Dwi Hantoko., B.Sc., M.Sc (King Fahd University of Petroleum and Minerals, Arab Saudi) [SCOPUS ID: 57203536113]
  - Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng. (Institut Pertanian Bogor, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195301854]
  - Dr. Eng. Ir. Nur Indrianti, M.T. (UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia) [SCOPUS ID: 15071306300]
  - Dr. Eng. Yoanda Alim Syahbana, S.T., M.Sc. (Politeknik Caltex Riau, Indonesia) [SCOPUS ID: 37075904000]
  - Dr. Haruman Wiranegara, S.T, M.T. (Balai Besar Logam dan Mesin - Kementerian Perindustrian, Indonesia) [SINTA ID: 6714161]

- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM.(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200332569]
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T. (Univeristas Sriwijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57193694034]
- Dr. Ir. Ariani Budi Safarina, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME. (Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia) [SCOPUS ID: 6507211795]
- Dr. Ir. Endang Prasetyaningsih, M.T. (Univesitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189580587]
- Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195229456]
- Dr. Ir. Nita Puspita Hidayat, M.T. (Universitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201677362]
- Dr. Ir. Oviyan Patra, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6756651]
- Dr. Ir. Sutarno, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [fSCOPUS ID: 57205031839]
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. (Universitas Sebelas Maret, Indonesia) [SCOPUS ID: 37114996900]
- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 55584284500]
- Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6098629]
- Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56951380600] [ORCHID ID: 0000-0003-0200-418X] [SINTA ID: 6001600]
- Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56582391600]
- Dr. Sabhan Kanata, ST., M.Eng. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57420428900] \*
- Dr. Suhartono, S.T., M.Si. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
- Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia) [SCOPUS ID: 15838524700]
- Dr.-Ing. Amalia Suzianti, S.T., M.Sc. (Universitas Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 55836286200]
- Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D (Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 36093026700] \*

- Ir. Harry Ramza, MT., P.hD. (Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
- P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T., Ph.D. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55983351800]
- Putu Doddy Sutrisna, S.T., M.T., Ph.D. (Universitas Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 6504553709]
- Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D. (Politeknik Negeri Semarang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194209980]
- Aji Gumilar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6082397]
- Aji Putro Prakoso, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200571585] [ORCHID ID: 0000-0002-7290-7352] [SINTA ID: 6747587]
- Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc. (Univeristas Islam Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195477115]
- Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T. (University of Electro-Communications (UEC), Jepang) [SCOPUS ID: 57188573899]
- Atik Charisma, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188567470] [SINTA ID: 6082832] \*
- Edwar, S.T., M.T. (Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215427881]
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194219446] \*
- Herman Budi Harja, S.T., M.T. (Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201665196] \*
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPM. (Universitas Muslim Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201065526]
- Ir. Ketut Tomy Suhari, M.T., IPP (Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57196485539]
- Ir. Nana Heryana, S.T., M.T., IPM. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 35174665300] \*
- Jamaluddin Bangki, S.T., M.T. (Universitas Dayanu Ikhsanuddin, Indonesia) [SINTA ID: 6082832]
- Khamaludin, S.T., M.T. (Universitas Islam Syekh Yusuf, Indonesia) [SCOPUS ID: 57223191789]
- M. Reza Hidayat, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188573208]
- Naftalin Winanti, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200994613] \*

- Nirmawana Simarmata, S.Pd., M.Sc. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57301196400]
- Salita Ulitia Prini, S.T., M.T. (Badan Riset dan Inovasi Nasional - BRIN, Indonesia) [SCOPUS ID: 57208581701] \*
- Sofyan Basuki, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6686946]
- Sussi, S.Si., M.T. (Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215071175]
- Syah Alam, S.Pd., M.T. (Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622] \*
- Tommi Hariyadi S.T., M.T. (Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 53263841200]
- Wahyu Setyo Pambudi, S.T., M.T. (ITATS Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57202921245]



## DAFTAR ISI

<b>Penambahan Gardu Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan GUI Matlab di Wilayah Tangerang</b> Adri Senen, Oktaria Handayani, dan Christine Widyastuti	01-09
<b>Aplikasi Metode HIRARC dan Domino untuk <i>Risk Assessment</i> Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Proyek Pengendali Banjir Tukad Unda di Wilayah Kabupaten Klungkung</b> Ni Putu Indah Yuliana, Fransiska Moi, dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni	10-22
<b>Antena Helix Mode Axial untuk Frekuensi Kerja Radar <i>S-Band</i></b> M. Reza Hidayat, Aditya Febryana, Nivika Tiffany Somantri, dan Yussi Perdana Saputera	23-35
<b>Pengaturan Parameter <i>Power System Stabilizer</i> pada Pembangkit di Sistem IEEE 39 Bus</b> Hasna Satya Dini dan Rizki Pratama Putra	36-43
<b>Analisis Variabel Perubahan Suhu Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Dielektrik Udara</b> Christiono, Miftahul Fikri, Iwa Garniwa MK, Kartika Tresya Mauriraya	44-52
<b>Analisis Kekuatan Struktur Pasca <i>Retrofitting</i> pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang</b> Luluk Kristanto, Sumargo, dan Muhammad Iqbal	53-64
<b>Simulasi Perpindahan Panas pada <i>Pipa Secondary Super Heater</i> (SSH) PLTU 600 MW dengan CFD</b> Gugum Gumilar dan Tarsisius Kristyadi	65-75
<b>Analisis Kegagalan pada Komponen <i>Work Roll</i> Setelah Perlakuan Panas</b> Rifqi Al Hakim dan Herry Oktadinata	76-85
<b>Perancangan Sistem Pengukuran, Pengendalian, dan Akuisisi Data Menggunakan Arduino dengan Antarmuka WinForms. Studi Kasus: Temperatur</b> Faiprianda Assyari Rahmatullah, Rafly Yose Putra, Muhammad Iwan Fermi, Hari Rionaldo	86-96
<b>Studi Kejenuhan pada <i>Current Transformer</i> (CT) Akibat Arus Hubung Singkat</b> Giri Angga Setia, Een Taryana, Naufal Nur Aiman, Ahmad Daelami, dan Hikmah Prasetya	97-104



## DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 22 Nomor 1, bulan Mei 2023. Dalam edisi ini disajikan 10 (sepuluh) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, dan Teknik Industri yang meliputi: (1) Penambahan Gardu Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan GUI Matlab di Wilayah Tangerang, (2) Aplikasi Metode HIRARC dan Domino untuk *Risk Assessment* Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Proyek Pengendali Banjir Tukad Unda di Wilayah Kabupaten Klungkung, (3) Antena Helix Mode Axial untuk Frekuensi Kerja Radar *S-Band*, (4) Pengaturan Parameter *Power System Stabilizer* pada Pembangkit di Sistem IEEE 39 Bus, (5) Analisis Variabel Perubahan Suhu Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Dielektrik Udara, (6) Analisis Kekuatan Struktur Pasca *Retrofitting* pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang, (7) Simulasi Perpindahan Panas pada *Pipa Secondary Super Heater* (SSH) PLTU 600 MW dengan CFD, (8) Analisis Kegagalan pada Komponen *Work Roll* Setelah Perlakuan Panas, (9) Perancangan Sistem Pengukuran, Pengendalian, dan Akuisisi Data Menggunakan Arduino dengan Antarmuka WinForms. Studi Kasus: Temperatur, dan (10) Studi Kejenuhan pada *Current Transformer* (CT) Akibat Arus Hubung Singkat.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 22 (1) ini. Tak lupa juga kami ucapkan terima kasih kepada Mitra Bestari yang telah membantu hingga Jurnal Teknik ini dapat diterbitkan. Redaksi senantiasa mengundang peneliti, perencana, dan para fungsional lain untuk memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu teknik. Kritik dan saran atas ketidak-sempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, Mei 2023

Dewan redaksi

# Penambahan Gardu Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan GUI Matlab di Wilayah Tangerang

Adri Senen<sup>1</sup>, Oktaria Handayani<sup>1</sup>, dan Christine Widyastuti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan & Energi Terbarukan,

Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

[adrisenen@itpln.ac.id](mailto:adrisenen@itpln.ac.id), [oktaria@itpln.ac.id](mailto:oktaria@itpln.ac.id), [christine.widyastuti@itpln.ac.id](mailto:christine.widyastuti@itpln.ac.id)

## Abstrak

Perencanaan pengembangan sistem distribusi menjadi suatu yang sangat penting seiring dengan peningkatan kebutuhan beban listrik, dengan tetap memperhatikan sisi efisiensi penyaluran dan kualitas daya yang disalurkan ke konsumen. Penambahan jaringan distribusi tentunya akan mengakibatkan penambahan kapasitas dan jumlah transformator serta gardu distribusi. Oleh karena itu diperlukan perhitungan yang tepat untuk penentuan hal tersebut. Dalam penelitian ini, penambahan gardu distribusi didasarkan pada pemilihan *rating* trafo distribusi berdasarkan pertumbuhan bebannya. Pembebanan trafo distribusi dibuat maksimum 80 % dari *rating* kapasitasnya dengan model terdistribusi merata. Perhitungan penambahan Transformator distribusi memerlukan suatu pendekatan untuk menghubungkan total Transformator distribusi dan total gardu distribusi yaitu hasil rata-rata dari total Transformator distribusi dibagi dengan total gardu distribusi sehingga didapat nilai penambahan Gardu distribusi. Untuk merencanakan penambahan gardu distribusi memerlukan perhitungan yang cukup kompleks dan rumit. Agar perencanaan penambahan gardu distribusi menjadi lebih mudah, maka dapat menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) Matlab. Dengan adanya program GUI Matlab maka proyeksi untuk penambahan gardu induk dapat dilakukan dengan mudah, cepat dan juga tepat serta dapat diaplikasikan untuk wilayah manapun dengan lebih akurat. Berdasarkan hasil simulasi GUI didapatkan total penambahan kapasitas trafo untuk wilayah Tangerang adalah sebesar 1,6 MVA dengan penambahan gardu distribusi sebanyak 7 unit.

Kata kunci: pertumbuhan beban, gardu distribusi, transformator, *graphic user interface*

## Abstract

Distribution system development Planning is very important in line with the increasing need for electricity loads, attention must be paid to quality of power delivered to consumers. The addition of a distribution network will certainly result in an increase in the capacity and number of transformers and distribution substations. The addition of distribution substations was based on the selection of distribution transformer ratings based on the growth of their load. The distribution transformer loading is made at a maximum of 80% with distributed model. Distribution transformers addition calculation requires an approach to connect the total distribution transformers and distribution substations, namely the average result of the total distribution transformers divided by the total distribution substations, it requires quite complex calculations. To make planning for adding distribution substations easier, you can use the Matlab Graphical User Interface (GUI). With the Matlab GUI program, projections for adding substations can be done easily, quickly, and precisely, and can be applied to any region more accurately. Based on the results of the GUI simulation, it was found that the total additional transformer capacity for the Tangerang area was 1.6 MVA with the addition of 7 distribution substations.

Keywords: load growth, distribution substation, transformer, *graphic user interface*

## 1. Pendahuluan

Gardu distribusi merupakan suatu komponen tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari tegangan menengah ke tegangan rendah. Jumlah gardu distribusi yang tersebar di suatu wilayah merupakan gambaran dari pola konsumsi listrik wilayah tersebut (Nnachi, Akumu, Richards, & Nicolae, 2018). Semakin banyak dan semakin tersebar nya gardu distribusi dapat menyatakan bahwa di wilayah tersebut memiliki kerapatan beban dan jumlah pelanggan yang mengonsumsi tenaga listrik tinggi. Salah satu peralatan yang terdapat di gardu distribusi adalah transformator distribusi. Transformator distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah ke tegangan rendah (Firdaus, Penangsang, Soeprijanto, & Dimas Fajar, 2018) (Hertel et al., 2022). Semakin besar kebutuhan tenaga listrik, semakin besar juga penambahan transformator yang dibutuhkan. Seiring dengan bertambahnya unit transformator distribusi, maka berdampak juga terhadap penambahan gardu distribusi (Gde Made Yoga Semadhi Artha, 2019).

Wilayah urban menjadi ikon wilayah yang memiliki tingkat pertumbuhan ekonomi tinggi dengan mobilitas yang beragam. Hal tersebut berdampak pada kebutuhan tenaga listrik yang terus meningkat tiap tahunnya (Lekshmi & Subramanya, 2019) (Handayani, Senen, Widyastuti, & Sukma, 2021). Proses pendistribusian tenaga listrik harus dilakukan secara kontinu dan tetap

### Info Makalah:

Dikirim : 02-08-23;

Revisi 1 : 03-08-23;

Diterima : 03-13-23.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 878-7179-4354

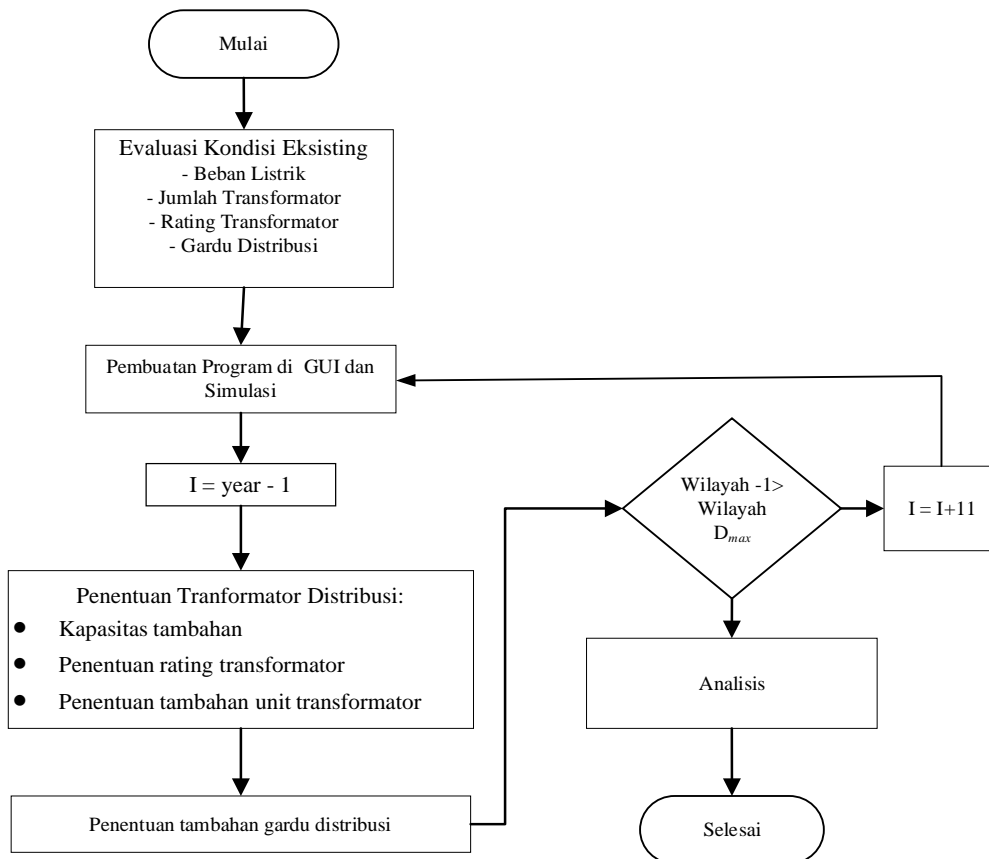
e-mail : [adrisenen@itpln.ac.id](mailto:adrisenen@itpln.ac.id)

memperhatikan kualitas tenaga listrik. Namun di sisi lain, wilayah urban memiliki keterbatasan lahan yang dapat digunakan untuk penambahan jaringan tenaga listrik seperti penempatan gardu distribusi (Afrasiabi et al., 2020) (Gligor, Vlasa, Dumitru, Moldovan, & Damian, 2020). Perencanaan yang matang untuk penambahan gardu distribusi perlu dilakukan secara tepat dan terarah agar tetap efisien dan memperhatikan unsur kualitas tenaga listrik yang di pasok (S. Zhang, Wang, Zhang, Wang, & Zhang, 2020). Perencanaan penambahan gardu distribusi dilakukan berdasarkan kondisi eksisting di wilayah yang diuji, sebagai contoh dalam penelitian ini menggunakan area Tangerang (Senen, Widyastuti, Handayani, & Putera, 2021). Kondisi eksisting tersebut meliputi kebutuhan tenaga listrik, jumlah transformator dan jumlah gardu distribusi. Kebutuhan tenaga listrik yang semakin meningkat diproyeksikan terlebih dahulu selama 10 tahun berdasarkan pola pertumbuhan beban di suatu wilayah. Dari proyeksi pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik selama periode 10 tahun tersebut, tahap selanjutnya yaitu memproyeksikan kebutuhan tambahan dari transformator dan juga gardu distribusi (Lekshmi & Subramanya, 2019) (S. Zhang et al., 2020). Penambahan transformator menyesuaikan standar SPLN yaitu pembebanan transformator distribusi tetap dijaga tidak melebihi 80% (McNeil, Karali, & Letschert, 2019). Penambahan transformator distribusi akan memberikan efek terhadap penambahan gardu distribusi.

Penyelesaian perencanaan tersebut dapat dipermudah dengan pengaplikasian GUI Matlab (Oulasvirta, Dayama, Shiripour, John, & Karrenbauer, 2020). GUI Matlab merupakan salah satu program yang ada di Matlab yang memiliki keunggulan *user friendly* karena tampilan dan penggunaannya yang mudah (Otong, 2019). Program yang dirancang di GUI Matlab tidak hanya dapat digunakan untuk penelitian ini, namun dapat juga diaplikasikan untuk membantu wilayah lain menentukan kebutuhan tenaga listrik, kapasitas tambahan transformator distribusi dan juga gardu distribusi. Dengan adanya program GUI ini, perencanaan gardu distribusi menjadi tepat dan efisien.

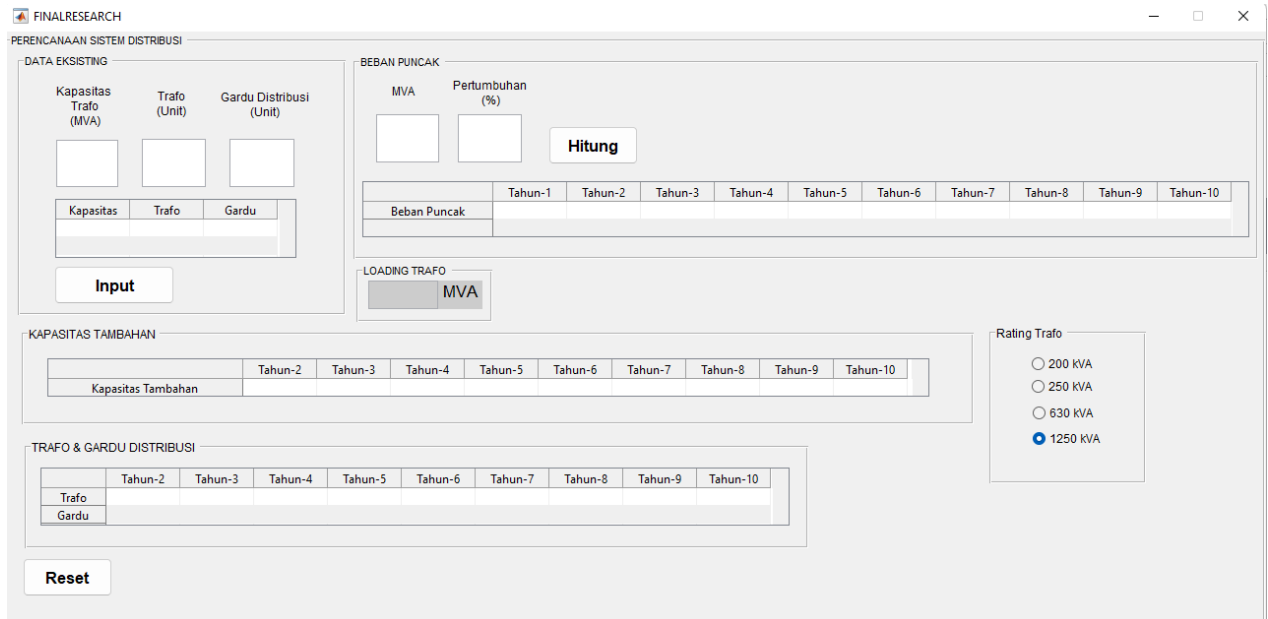
## 2. Metode

Proyeksi penambahan gardu distribusi dilakukan sebagai upaya penyediaan listrik mempertahankan kelancaran proses penyaluran tenaga listrik. Penambahan gardu distribusi dilakukan berdasarkan pertumbuhan beban listrik tiap tahunnya. Dengan adanya penambahan kapasitas tenaga listrik, maka akan mempengaruhi jumlah transformator dan gardu distribusi yang perlu dipersiapkan. Perencanaan tersebut akan lebih mudah dengan memanfaatkan GUI Matlab GUI Matlab merupakan singkatan dari *Graphical User Interface* Matlab yang merupakan suatu aplikasi display yang terdiri dari tugas, perintah, maupun komponen program yang dapat mempermudah pengguna dalam menjalankan suatu program (He & Li, 2020). Berikut ini merupakan alur penelitian.



Gambar 1. Alur Penelitian.

Di bawah ini merupakan sebuah tampilan desain *Graphical User Interface* (GUI) yang digunakan untuk melakukan suatu perhitungan perencanaan terhadap transformator dan gardu distribusi.



Gambar 2. GUI Matlab untuk Proyeksi Penambahan Gardu Distribusi.

## 2.1. Penentuan Kebutuhan Tenaga Listrik

Skema penentuan kebutuhan tenaga listrik merupakan tahap awal yang dilakukan, hal ini bertujuan untuk dapat memberikan gambaran seberapa besar kapasitas tenaga listrik yang perlu dipasok pada tahun – tahun mendatang. Hal tersebut juga akan berdampak pada analisis kondisi eksisting. Apakah kondisi eksisting untuk transformator distribusi dan gardu distribusi sanggup untuk melayani penambahan pasokan listrik sesuai dengan standar yang berlaku. Pada tahap ini, perencanaan kebutuhan tenaga listrik di proyeksikan selama 10 tahun berdasarkan dengan pertumbuhan beban listrik pada suatu wilayah.



Gambar 3. Pertumbuhan Kebutuhan Beban listrik.

## 2.2. Penentuan Transformator Distribusi

Penentuan transformator distribusi merupakan tindak lanjut dari penelitian ini. Sesuai SPLN, pembebanan transformator distribusi tidak boleh melebihi 80% dari kapasitas transformator distribusi. Hal ini dilakukan untuk menjaga *lifetime* dari transformator (Prakash, Islam, Mamun, & Pota, 2020). Penentuan transformator distribusi meliputi beberapa tahap yaitu:

- Penentuan Kapasitas Tambahan dari Transformator Distribusi

Pada tahap ini, data kondisi eksisting pembebanan transformator dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui, bagaimana pembebanan transformator tiap tahun berdasarkan pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik yang meningkat tiap tahunnya (Meng, 2022) (J. Zhang, Liu, Liu, Xu, & Kang, 2018). Jika pada saat tahun 2 dan seterusnya pembebanan transformator sudah melebihi 80% kapasitas transformator, maka perlu dilakukan penambahan transformator pada tahun tersebut. Secara matematis, perhitungan untuk menentukan besarnya kapasitas tambahan dari transformator distribusi adalah sebagai berikut :

$$kVA_{tambahan} = \left( \frac{MVA_{BP_{kel}}}{80\%} - MVA_{terpasang} \right) \cdot 1000 \quad (1)$$

- Penentuan *Rating* Kapasitas Transformator

Penentuan *rating* kapasitas transformator di penelitian ini dilakukan berdasarkan kondisi eksisting transformator distribusi. *Rating* kapasitas transformator yang di programkan di GUI bervariasi yaitu 200 kVA, 250 KVA, 630 kVA dan 1250 kVA.

- Penentuan Tambahan Unit Transformator Distribusi

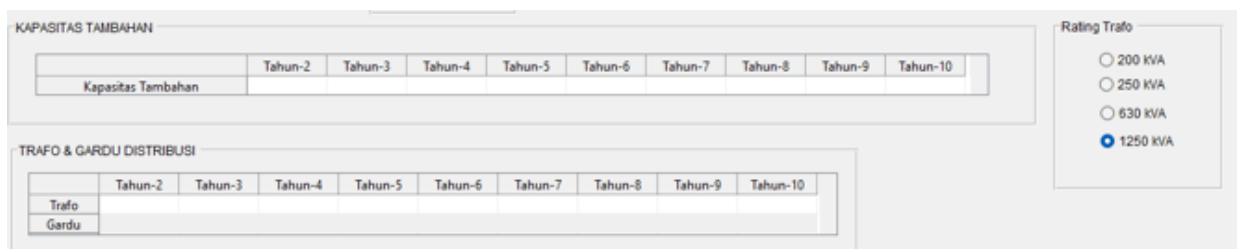
Tambahan Unit transformator distribusi dilakukan setelah transformator eksisting tidak mampu menampung beban atau sudah melebihi 80% kapasitas transformator distribusi (Dwiyoko, Sukisno, & Damarwan, 2020). Dengan mempertimbangkan *rating* transformator yang dipilih maka dapat ditentukan berapa unit tambahan unit transformator yang dibutuhkan tiap tahunnya menyesuaikan pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik (Djamali, Tenbohlen, Junge, & Konermann, 2018) (Dwiyoko et al., 2020). Secara matematis, penentuan tambahan unit transformator distribusi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\Delta TD = \text{Roundup} \left( \frac{\left( \frac{MVA_{BP\_kel}}{80\%} - MVA_{terpasang} \right) \cdot 1000}{kVA_{Rating\_TD}} \right) \quad (2)$$

### 2.3. Penentuan Gardu Distribusi

Tahap selanjutnya merupakan tahap penentuan gardu distribusi. Seiring dengan dilakukannya penambahan transformator distribusi, tentunya berdampak juga terhadap penambahan gardu distribusi yang disesuaikan dengan transformator dan gardu pada data eksisting di wilayah tersebut (Sbravati, Oka, Maso, & Valmus, 2018). Secara matematis, untuk menghitung jumlah gardu distribusi tambahan dapat menggunakan rumus:

$$RTPG = \frac{TD}{GD} \quad (3)$$



Gambar 4. Tampilan GUI untuk Penentuan Transformator dan Gardu Distribusi.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini merupakan sampel kondisi eksisting Wilayah Tangerang yang memiliki 119 kelurahan, kondisi eksisting tersebut melingkupi beban puncak, jumlah transformator, pembebanan transformator, jumlah gardu distribusi yang disajikan pada tabel 1 berikut ini :

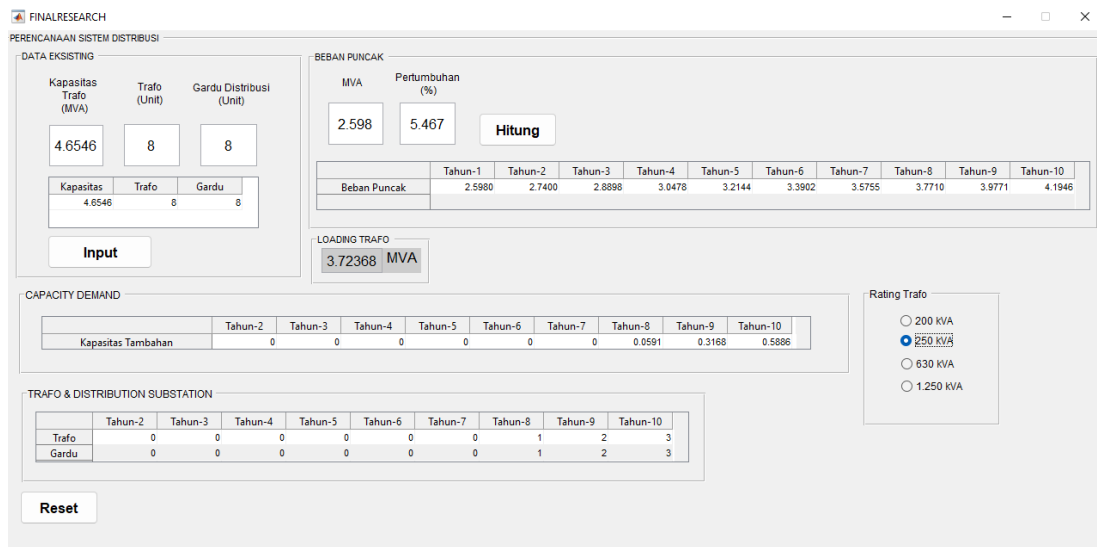
Tabel 1. Pertumbuhan Beban Listrik.

Kelurahan	Pertumbuhan beban listrik Tahun ke – (MVA)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Belendung</b>	0,88	0,92	0,97	1,02	1,08	1,15	1,22	1,30	1,40	1,50
<b>Bunder</b>	25,48	26,67	28,01	29,52	31,20	33,10	35,23	37,62	40,30	43,31
<b>Cibadak</b>	11,64	12,18	12,79	13,48	14,25	15,12	16,09	17,18	18,41	19,78
<b>Talaga</b>	28,85	30,19	31,71	33,41	35,32	37,47	39,88	42,59	45,62	49,03
<b>Cisoka</b>	14,15	14,81	15,56	16,39	17,33	18,38	19,56	20,89	22,38	24,05
<b>Bojong</b>	17,07	17,86	18,76	19,77	20,90	22,17	23,59	25,19	26,99	29,00
<b>Rajeg</b>	15,84	16,58	17,42	18,35	19,40	20,58	21,90	23,39	25,06	26,93
<b>Solear</b>	23,50	24,60	25,84	27,22	28,78	30,53	32,49	34,70	37,17	39,94
<b>Cikande</b>	19,54	20,45	21,48	22,63	23,93	25,38	27,01	28,85	30,90	33,21
<b>Pinang</b>	0,75	0,78	0,82	0,86	0,91	0,97	1,03	1,10	1,18	1,27

Tabel 2. Kondisi Eksisting.

Kelurahan	Jumlah Transformator (Unit)	Pembebanan Transformator (%)	Rating Transformator (MVA)	Jumlah Gardu Distribusi (Unit)
Belendung	3	55,8	250	3
Bunder	76	55,8	250	70
Cibadak	34	55,8	250	32
Talaga	85	55,8	250	78
Cisoka	42	55,8	250	39
Bojong	57	55,8	250	47
Rajeg	47	55,8	50	44
Solear	70	55,8	250	65
Cikande	58	55,8	250	54
Pinang	2	55,8	250	2

Dari data eksisting tersebut maka dilakukan simulasi untuk memperkirakan pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik tiap tahun sampai periode 10 tahun. Berikut ini merupakan contoh tampilan hasil simulasi GUI untuk kelurahan Rawakalong.



Gambar 5. Hasil Simulasi GUI.

Berikut ini merupakan sampel perhitungan untuk tahun ke 8 kelurahan Belendung mulai dari perhitungan pembebanan transformator, kapasitas tambahan, jumlah transformator tambahan dan tambahan gardu distribusi menggunakan persamaan (1), (2) dan (3). Data-data berikut didapatkan dari tabel 1 dan tabel 2 di atas. Tahun ke 8 dipilih karena pembebanan transformator pada tahun ke 8 sudah lebih dari 80%.

- Beban puncak = 1.30 MVA  
Pembebanan Transformator =  $\frac{1.30}{1.58} \times 100\% = 82,40\%$  (Pembebanan >80%)
- Kapasitas Tambahan =  $\left(\frac{MVA_{BP\_Kel}}{80\%} - MVA_{terpasang}\right) \cdot 1000$   
=  $\left(\frac{1.30}{80\%} - 1.580\right) \cdot 1000$   
= 47,48 kVA = 0,04 MVA
- $\Delta TD_8$  =  $\text{Roundup}\left(\frac{\left(\frac{MVA_{BP\_Kel}}{80\%} - MVA_{terpasang}\right) \cdot 1000}{kVA_{Rating\_TD}}\right) - \Delta TD_7$   
=  $\text{Roundup}\left(\frac{\left(\frac{1.30}{80\%} - 1.580\right) \cdot 1000}{0.25}\right) - 0$   
= 1

$$\begin{aligned} \bullet \Delta GD_{kel} &= Roundup\left(\frac{TD_{eksist} + \Delta TD}{\frac{TD_{AJ}}{GD_{AJ}}}\right) - GD_{eksist} \\ &= Roundup\left(\frac{3 + 1}{\frac{3}{3}}\right) - 3 \\ &= 1 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menginputkan sampel 10 kelurahan yang ada di wilayah Tangerang dari total 119 kelurahan maka didapatkan hasil seperti pada tabel berikut ini:

Tabel 3. Hasil Perhitungan dengan Simulasi GUI.

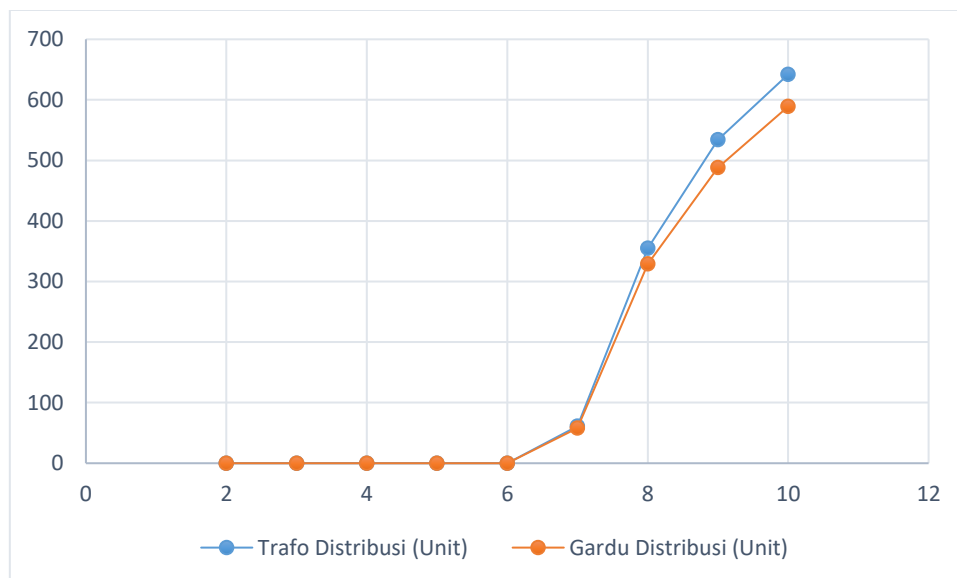
Kelurahan	Parameter	1	8	9	10
<b>Belendung</b>	Beban Puncak (MVA)	0,88	1,30	1,4	1,5
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,04	0,16	0,29
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,9
	Tambahan Transformator (Unit)	0	1	0	1
	Tambahan Gardu (Unit)	0	1	0	1
<b>Bunder</b>	Beban Puncak (MVA)	25,5	42,3	46,3	51
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	1,4	4,7	8,5
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	6	13	15
	Tambahan Gardu (Unit)	0	6	12	13
<b>Cibadak</b>	Beban Puncak (MVA)	11,6	19,3	21,2	23,3
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,6	2,2	3,9
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	3	6	7
	Tambahan Gardu (Unit)	0	2	6	6
<b>Talaga</b>	Beban Puncak (MVA)	28,8	47,8	52,4	57,7
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	1,5	5,3	9,6
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	7	15	17
	Tambahan Gardu (Unit)	0	7	14	15
<b>Cisoka</b>	Beban Puncak (MVA)	14,2	23,5	25,7	28,3
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,8	2,6	4,7
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,2	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	4	7	8
	Tambahan Gardu (Unit)	0	4	6	7
<b>Bojong</b>	Beban Puncak (MVA)	17,1	28,3	31	34,2
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,9	3,2	5,7
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,9
	Tambahan Transformator (Unit)	0	4	9	10
	Tambahan Gardu (Unit)	0	4	8	9
<b>Rajeg</b>	Beban Puncak (MVA)	15,8	26,3	28,8	31,7
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,8	2,9	5,3
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,2	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	4	8	10
	Tambahan Gardu (Unit)	0	3	8	9
<b>Solear</b>	Beban Puncak (MVA)	23,5	39	42,7	47
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	1,3	4,3	7,8
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,8
	Tambahan Transformator (Unit)	0	6	12	14
	Tambahan Gardu (Unit)	0	5	11	13
<b>Cikande</b>	Beban Puncak (MVA)	19,5	32,4	35,6	39,1
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	1,1	3,6	6,5
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,9
	Tambahan Transformator (Unit)	0	5	10	11
	Tambahan Gardu (Unit)	0	4	9	10
<b>Pinang</b>	Beban Puncak (MVA)	0,7	1,2	1,4	1,5
	Kapasitas Tambahan Transformator (MVA)	0	0,1	0,1	0,2
	Pembebanan Transformator (%)	55,8	82,4	88,3	94,9
	Tambahan Transformator (Unit)	0	1	0	0
	Tambahan Gardu (Unit)	0	1	0	0



Berdasarkan hasil simulasi, kebutuhan tenaga listrik tiap tahun semakin meningkat berdasarkan pertumbuhan beban tiap tahunnya, Pada tahun ke 2 sampai tahun ke 10, rata-rata tiap kelurahan belum membutuhkan adanya penambahan transformator maupun gardu distribusi, Hal ini dikarenakan transformator eksisting masih mampu menopang pertumbuhan beban listrik, penambahan transformator dan gardu distribusi dilakukan pada tahun ke 8, 9 dan 10 karena pembebanan transformator sudah tidak sesuai dengan SPLN 50:1997 yaitu pembebanan transformator distribusi tidak boleh melebihi 80%, Sejalan dengan penambahan transformator, maka sesuai dengan rumus (3), Maka gardu distribusi juga ikut bertambah, Pemanfaatan GUI Matlab mampu mempercepat proses perencanaan proyeksi penambahan gardu distribusi. Program GUI Matlab yang dikembangkan, tidak hanya dapat dimanfaatkan untuk wilayah Tangerang saja, namun program ini dapat mengakomodir kebutuhan tiap wilayah dalam melakukan perencanaan kebutuhan transformator dan gardu induk berdasarkan pertumbuhan beban dan kondisi eksisting.

Tabel 4. Rekapitulasi Penambahan Transformator dan Gardu Distribusi.

Tahun ke -	Trafo Distribusi (Unit)	Gardu Distribusi (Unit)
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	61	58
8	355	329
9	534	488
10	642	589



Gambar 6. Grafik Penambahan Transformator dan Gardu Distribusi sampai Tahun Ke 10.

Dari hasil simulasi dengan menggunakan rumus (1), (2) dan (3) diketahui bahwa sampai tahun ke 10, untuk total wilayah Tangerang membutuhkan total tambahan transformator distribusi sebanyak 642 unit dengan sebaran *rating* transformator 200 kVA, 250 kVA, 630 kVA dan 1250 kVA serta memerlukan tambahan gardu distribusi sebanyak 589 unit yang tersebar ke 119 kelurahan di wilayah Tangerang.

### Kesimpulan

Proyeksi penambahan transformator dan gardu distribusi sangat perlu dilakukan agar penyaluran tenaga listrik tidak terganggu mengingat kebutuhan akan tenaga listrik yang semakin berkembang terutama di wilayah urban yang memiliki mobilitas dan pertumbuhan ekonomi yang tinggi. Perencanaan ini dilakukan berdasarkan kondisi eksisting seperti pertumbuhan beban, beban puncak, jumlah transformator, *rating* transformator dan juga jumlah gardu induk. Kondisi eksisting tersebut dijadikan input untuk menjalankan simulasi di GUI Matlab. Dengan memanfaatkan GUI Matlab dapat mempercepat proses perhitungan dan GUI Matlab merupakan fitur yang mudah untuk dipahami pengguna. Program ini mampu diaplikasikan di wilayah manapun untuk membantu melakukan proyeksi kebutuhan gardu distribusi. Berdasarkan hasil simulasi sampai tahun ke 10, wilayah Tangerang memerlukan tambahan transformator distribusi sebanyak 642 unit dan gardu distribusi sebanyak 589 unit.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi PLN dengan kontrak penelitian adalah Nomor: 0330/SK/1/A0/11/2021

## Daftar Notasi

$kVA_{tambahan}$	= Kapasitas tambahan transformator
$MVA_{BP_{kel}}$	= Kapasitas beban puncak suatu wilayah
$MVA_{terpasang}$	= Kapasitas Transformator terpasang
$MVA_{BP_{kel}}$	= Kapasitas beban puncak suatu wilayah
$MVA_{terpasang}$	= Kapasitas Transformator terpasang
$kVA_{Rating_{TD}}$	= Rating transformator eksisting
$TD$	= Jumlah transformator distribusi
$GD$	= Jumlah gardu distribusi

## Daftar Pustaka

- Afrasiabi, M., Mohammadi, M., Rastegar, M., Stankovic, L., Afrasiabi, S., & Khazaei, M. (2020). Deep-Based Conditional Probability Density Function Forecasting of Residential Loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3646–3657. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2972513>
- Djamali, M., Tenbohlen, S., Junge, E., & Konermann, M. (2018). Real-Time Evaluation of the Dynamic Loading Capability of Indoor Distribution Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(3), 1134–1142. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2728820>
- Dwiyoiko, G., Sukisno, T., & Damarwan, E. S. (2020). Proyeksi Kebutuhan Energi Listrik Kabupaten Purbalingga Tahun 2030 Menggunakan Software Leap. *Jurnal Edukasi Elektro*, 4(1), 29–40. <https://doi.org/10.21831/jee.v4i1.32043>
- Firdaus, A. A., Penangsang, O., Soeprijanto, A., & Dimas Fajar, U. P. (2018). Distribution network reconfiguration using binary particle swarm optimization to minimize losses and decrease voltage stability index. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 7(4), 514–521. <https://doi.org/10.11591/eei.v7i4.821>
- Gde Made Yoga Semadhi Artha, I. (2019). Transformer's Load Forecasting to Find the Transformer Usage Capacity with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Method. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.jeee.20190701.11>
- Gligor, A., Vlasa, I., Dumitru, C.-D., Moldovan, C. E., & Damian, C. (2020). Power Demand Forecast for Optimization of the Distribution Costs. *Procedia Manufacturing*, 46, 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.056>
- Handayani, O., Senen, A., Widyastuti, C., & Sukma, D. Y. (2021). Micro-Spatial Electricity Planning in Urban Area Based on Energy Demand. *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021*, 155–160. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601086>
- He, S., & Li, P. (2020). A MATLAB based graphical user interface (GUI) for quickly producing widely used hydrogeochemical diagrams. *Chemie Der Erde*, 80(4). <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125550>
- Hertel, M., Ott, S., Neumann, O., Schäfer, B., Mikut, R., & Hagenmeyer, V. (2022). *Transformer Neural Networks for Building Load Forecasting*. (December), 0–7. Retrieved from <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/ElectricityLoadDiagrams20112014>
- Lekshmi, M., & Subramanya, K. N. A. (2019). Short-Term Load Forecasting of 400kV Grid Substation Using R-Tool and Study of Influence of Ambient Temperature on the Forecasted Load. *2019 Second International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICACCP.2019.8883005>
- McNeil, M. A., Karali, N., & Letschert, V. (2019). Forecasting Indonesia's electricity load through 2030 and peak demand reductions from appliance and lighting efficiency. *Energy for Sustainable Development*, 49, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.01.001>
- Meng, Z. (2022). *Bagging Based Multi-Source Learning and Transfer Regression for Electricity Load Forecasting*. 49(2).
- Nnachi, G. U., Akumu, A. O., Richards, C. G., & Nicolae, D. V. (2018). Estimation of no-Load Losses in Distribution Transformer Design Finite Element Analysis Techniques in Transformer Design. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, PowerAfrica 2018*, 527(1), 527–531. <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2018.8521142>
- Otong, M. (2019). Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Menggunakan Algoritma Genetika di Interkoneksi Penyulang Pakupatan dan Palima pada Beban Prioritas untuk Mengurangi Rugi Daya dan Jatuh Tegangan. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 8(2), 158. <https://doi.org/10.36055/setrum.v8i2.6796>
- Oulasvirta, A., Dayama, N. R., Shiripour, M., John, M., & Karrenbauer, A. (2020). Combinatorial Optimization of Graphical User Interface Designs. *Proceedings of the IEEE*, 108(3), 434–464.

- <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2969687>
- Prakash, K., Islam, F. R., Mamun, K. A., & Pota, H. R. (2020). Configurations of Aromatic Networks for Power Distribution System. *Sustainability*, 12(10), 4317. <https://doi.org/10.3390/su12104317>
- Sbravati, A., Oka, M. H., Maso, J. A., & Valmus, J. (2018). Enhancing Transformers Loadability for Optimizing Assets Utilization and Efficiency. *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, (June), 144–149. <https://doi.org/10.1109/EIC.2018.8481063>
- Senen, A., Widyastuti, C., Handayani, O., & Putera, P. (2021). Development of micro-spatial electricity load forecasting methodology using multivariate analysis for dynamic area in tangerang, indonesia. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 29(4), 2565–2578. <https://doi.org/10.47836/PJST.29.4.18>
- Zhang, J., Liu, K., Liu, G., Xu, B., & Kang, Y. (2018). Research on the Influence of Primary Load Imbalance on the Combined Transformer's Error. *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, (201804270000511), 1504–1511. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8602069>
- Zhang, S., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, D., & Zhang, N. (2020). Load probability density forecasting by transforming and combining quantile forecasts. *Applied Energy*, 277, 115600. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115600>

# Aplikasi Metode HIRARC dan Domino untuk Risk Assessment Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Proyek Pengendali Banjir Tukad Unda di Wilayah Kabupaten Klungkung

Ni Putu Indah Yuliana<sup>1</sup>, Fransiska Moi<sup>1</sup>, dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali, Badung, Indonesia

[putuindah3107@pnb.ac.id](mailto:putuindah3107@pnb.ac.id), [inmoi1909@pnb.ac.id](mailto:inmoi1909@pnb.ac.id), [ebthayuni@pnb.ac.id](mailto:ebthayuni@pnb.ac.id)

## Abstrak

Proyek pengendali banjir Tukad Unda melibatkan tugas yang rumit, yang menghadirkan potensi risiko terkait kesehatan dan keselamatan kerja. Tujuan penelitian mengidentifikasi risiko keselamatan serta kesehatan kerja, menentukan nilai risiko, menentukan penyebab risiko tertinggi dan menentukan pengendalian risiko. Penelitian memakai metode *Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control* dan Domino. Penelitian menunjukkan 101 identifikasi bahaya dengan 34 sumber bahaya, di mana kategori Sangat Tinggi 31 risiko, kategori *Tinggi* 46 risiko dan kategori *Sedang* 24 risiko. Faktor penyebab risiko tertinggi adalah kurangnya perhatian pekerja saat *safety talk*, kurang mengoptimalkan standar operasional prosedur kerja, luputnya pemeriksaan rutin alat dan area kerja, kurang terstrukturinya pengaturan posisi kerja dan rambu keselamatan, pekerja tidak memakai alat pelindung diri, pekerja kurang disiplin dalam penerapan alat pelindung diri, pekerja kurang peduli terhadap lingkungan area kerja, pekerja kurang waspada, pekerja bercanda saat melakukan pekerjaan, dan tidak menerapkan instruksi kerja. Pengendalian risiko dengan *tools box meeting*, mengatur posisi dan alat kerja, ijin kerja dan alat pelindung diri.

Kata kunci: risiko, keselamatan dan kesehatan kerja, *hazard identification risk assessment and risk control*, domino

## Abstract

Tukad Unda flood control project has complex work that poses occupational health and safety risks. The objectives of the study identify occupational safety and health risks, determine the value of risks, determine the causes of the *Tinggiest* risks and determine risk control. The research used the *Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control* and Domino methods. The study showed 101 hazard identifications with 34 sources of danger, of which the extreme category was 31 risks, the *Tinggi* category was 46 risks and the *Sedang* category was 24 risks. Factors causing the *Tinggiest* risk are the lack of attention of workers during safety talks, lack of optimizing standard operating procedures for work procedures, the absence of regular inspection of work equipment and areas, the lack of structured work position arrangements and safety signs, workers not wearing personal protective equipment, workers lacking discipline in the application of personal protective equipment, workers are less concerned about the work area environment, workers are less vigilant, workers joke when doing work and do not apply work instructions. Risk control with meeting box tools, arranging work positions and tools, work permits and personal protective equipment.

Keywords: risk, occupational safety and health, hazard identification risk assessment and risk control, domino

## 1. Pendahuluan

Proyek konstruksi dimaksudkan sebagai serangkaian tindakan dan interaksi antara berbagai kegiatan yang hanya dilakukan sekali dan memiliki batasan waktu tertentu (Erviyanto, 2005). Pelaksanaan proyek konstruksi selalu dihadapkan pada risiko dan ketidakpastian yang melekat didalamnya (Soeharto, 2001). Terdapat berbagai potensi sumber risiko dalam pelaksanaan proyek konstruksi, termasuk dalam aspek politik, lingkungan, perencanaan, pemasaran, ekonomi, keuangan, faktor alam, teknis, faktor manusia, potensi kejahatan, dan keselamatan (Norken, 2015). Sektor konstruksi juga seringkali menjadi penyebab utama terjadinya insiden kecelakaan kerja. Angka kecelakaan yang terjadi di Indonesia sebanyak 234.270 kasus pada 2021 di mana jumlah ini naik 5,65% dari tahun sebelumnya dengan klaim mencapai Rp 1,79 triliun (Mahdi, 2022). Hal ini didukung oleh penelitian tentang Manajemen Risiko K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja) pada Proyek Pembangunan Rumah Sakit Bali Mandara di mana diperoleh 80 item risiko dengan *Tinggi risk* 21 risiko, *Sedang risk* 32 risiko, *low risk* sebanyak 27 risiko (Jaya, 2021). Penelitian tentang Manajemen Risiko K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja) pada Proyek Konstruksi juga menjelaskan bahwa ada pengaruh signifikan antara penerapan keselamatan dan kesehatan kerja terhadap manajemen risiko (Tagueha, 2018). Penelitian lain tentang Analisis Risiko Kecelakaan Kerja pada Pekerja Proyek Pembangunan Perpipaan Air Limbah Kota Pekanbaru menghasilkan ada 12 sumber bahaya yang bisa menimbulkan 13 risiko lainnya, termasuk 4 risiko dengan kategori rendah, 7 risiko dengan kategori sedang, dan 2 risiko dengan kategori tinggi (Adha, 2022). Selain itu, penelitian tentang Pengidentifikasian Potensi Risiko dalam Pekerjaan Proyek Pengendalian Banjir Sungai Asahan Paket 2 PT. Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk Tahun 2018, menunjukkan hasil penilaian risiko dari potensi

### Info Makalah:

Dikirim : 08-04-22;

Revisi 1 : 03-20-23;

Revisi 2 : 05-08-23;

Diterima : 05-09-23.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-878-6245-1583

e-mail : [putuindah3107@pnb.ac.id](mailto:putuindah3107@pnb.ac.id)

bahaya pada tahapan pemancangan *concrete sheet pile* tingkat risiko dikategorikan *low* (6%), *Sedang low* (44%), *Sedang Tinggi* (39%), *Tinggi* (11%) dan pada tahapan pekerjaan timbunan tingkat risiko dikategorikan *low* (8%), *Sedang low* (21%), dan *Sedang Tinggi* (71%). Potensi bahaya dengan kategori *Tinggi* terutama dalam pekerjaan pemancangan *concrete sheet pile* (Wiguna, 2018). Studi lain juga mengungkapkan bahwa tingkat kecelakaan kerja dalam proyek normalisasi sungai cenderung tinggi, dengan insiden seperti tenggelam, tersengat listrik, benturan, dan tergelincir (Rijaluddin, 2015). Risiko-risiko K3 yang terjadi tentunya akan memberikan pengaruh terhadap kesehatan dan keselamatan para pekerja proyek, di mana kesehatan kerja adalah sesuatu hal yang memiliki kaitan dengan suatu pekerjaan dan lingkungan tempat pekerjaan dilaksanakan yang memberikan pengaruh terhadap produktivitas kerja (Tarwaka, 2008). Selain berdampak kepada produktivitas kerja, timbulnya kejadian risiko-risiko K3 juga memberikan imbas terhadap biaya dan waktu pelaksanaan proyek seperti penelitian tentang Analisis Manajemen Risiko Pembangunan Bendung Gerak Kanal Banjir Barat Kota Semarang dan Dampaknya Terhadap Lingkungan di mana ada 6 variabel faktor risiko yang dominan terhadap waktu dan biaya pada tahap pelaksanaan konstruksi yaitu kesulitan saat proses galian, kerusakan peralatan mesin dan perlengkapan proyek, perubahan desain menyesuaikan keadaan di lapangan, ketersediaan jumlah material, kondisi tanah yang tidak stabil, dan cuaca yang tidak menentu (Fatchiyati, 2019).

Proyek pembangunan prasarana pengendali banjir Tukad Unda yang terletak di Kabupaten Klungkung merupakan proyek untuk mengembalikan alur sungai ke kondisi semula. Selain itu, proyek ini juga ditujukan untuk melindungi sempadan sungai yang di bagian kanannya akan dibangun gedung Pusat Kebudayaan Bali. Pelaksanaan pembangunan infrastruktur pengendali banjir di Tukad Unda melibatkan pekerjaan yang kompleks dengan keterlibatan tenaga kerja, material, dan peralatan yang berpotensi menciptakan risiko terkait kesehatan dan keselamatan kerja. Permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini sejalan dengan tujuan penelitian, yakni untuk mengidentifikasi risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang terjadi di semua tahapan pekerjaan, menentukan nilai risiko berdasarkan hasil identifikasi, menentukan penyebab risiko K3 tertinggi berdasarkan metode Domino dan menentukan pengendalian terhadap risiko yang terjadi dengan memakai hirarki pengendalian risiko. Ruang lingkup penelitian hanya terbatas pada *risk assessment* risiko K3 yang terjadi di semua tahapan proyek pembangunan prasarana banjir Tukad Unda tanpa mengalokasikan kepemilikan risiko K3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang risiko K3 yang mungkin dapat terjadi khususnya pada bangunan konstruksi keairan, tingkat kejadian risiko K3, penyebab timbulnya risiko dominan (*Tinggi*) serta pengendalian yang harus dilakukan sehingga dapat meminimalisir kerugian yang mungkin dapat terjadi.

## 2. Metode

Penelitian dilakukan dengan metode HIRARC (*Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control*) untuk melakukan identifikasi risiko K3 dan penilaian tingkat kejadian risiko K3 dan metode Domino untuk menentukan penyebab dari kejadian risiko K3 tertinggi serta memakai hirarki pengendalian risiko dalam OHSAS 18001:2007 untuk menentukan pengendalian risiko. Metode HIRARC adalah suatu metode yang dipakai untuk mengidentifikasi bahaya yang mungkin dapat terjadi dalam sebuah kegiatan rutin maupun tidak rutin untuk selanjutnya dilakukan penilaian agar dapat diketahui tinggi rendahnya nilai risiko tersebut sehingga dapat disesuaikan tindakan pengendaliannya (Triswandana, 2020). Sedangkan, metode Domino ialah suatu metode yang dibuat oleh Heinrich dan rekannya pada tahun 1980 untuk proses identifikasi masalah berdasarkan penyebab timbulnya kecelakaan kerja. Metode Domino memberikan pemahaman bahwa munculnya suatu kejadian kecelakaan adalah bersumber dari satu faktor yang turut membuat faktor lainnya berperan dalam timbulnya kejadian kecelakaan tersebut sehingga menyebabkan terjadinya *loss* atau kehilangan akibat kecelakaan (Setiawan, 2017).

Terdapat 2 (dua) data yang dipakai yaitu data sekunder berupa jurnal, dan penelitian sebelumnya yang terkait dengan risiko K3 serta data primer melalui survei, observasi dan wawancara ke orang-orang yang memiliki keterlibatan dan pengetahuan dalam proyek pengendalian genangan. Pemilihan responden menggunakan metode *purposive sampling* yaitu teknik pengambilan sampel berdasarkan pertimbangan tertentu, di mana pertimbangan tertentu ini ditentukan dengan pengalaman minimal 5 tahun dan keterlibatan responden dalam pelaksanaan proyek. Adapun responden yang dipakai sebanyak 20 orang yang terdiri dari kontraktor 5 orang, konsultan pengawas 5 orang, konsultan perencana 5 orang dan pemilik 5 orang. Berdasarkan hasil survei, observasi dan wawancara diperoleh identifikasi risiko K3 yang terjadi di semua tahapan pelaksanaan proyek untuk selanjutnya disusun kuesioner dan disebar kepada responden yang terdiri dari kontraktor 5 orang, konsultan pengawas 5 orang, konsultan perencana 5 orang dan pemilik 5 orang untuk memperoleh penilaian dan opini terkait kejadian risiko K3.

Penilaian risiko didasarkan pada perkalian antara modulus skala *likelihood* (frekuensi) dan skala *consequences* (konsekuensi) menurut *Risk Management Standard AS/NZS 4360:1999*. Skala frekuensi yaitu nilai 1 (sangat jarang terjadi), nilai 2 (jarang), nilai 3 (dapat terjadi sekali-sekali), nilai 4 (sering) dan nilai 5 (dapat terjadi setiap saat). Skala konsekuensi yaitu nilai 1 (tidak terjadi cedera, kerugian finansial sedikit), nilai 2 (cedera ringan, kerugian finansial sedang), nilai 3 (cedera sedang, perlu penanganan medis, kerugian finansial besar), nilai 4 (cedera berat > 1 orang, kerugian besar, gangguan produksi) dan nilai 5 (fatal > 1 orang, kerugian sangat besar dan dampak sangat luas, terhentinya seluruh kegiatan) (Peruzzi, 2020). Berdasarkan hasil penilaian tingkat risiko, dilakukan pemilahan untuk

mengumpulkan tingkat risiko kategori Sangat Tinggi untuk selanjutnya dibuatkan hubungan mata rantai dalam bentuk Domino untuk faktor-faktor penyebab kecelakaan kerja yang di mana dalam kotak Domino berisikan 5 (lima) faktor penyebab kecelakaan yaitu *lack of management, basic cause of accident, problem arises, incident* dan *loss* (Mulyani, 2016). Pengelolaan risiko akan mengikuti rangkaian pengendalian risiko yang mencakup eliminasi, substitusi, pengendalian teknis, pengendalian administratif, dan penggunaan alat pelindung diri (APD) (Yuni, 2021).

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Pencatatan Bahaya

Pencatatan peristiwa kejadian bahaya terkait keselamatan dan kesehatan kerja didapatkan melalui pengamatan kondisi proyek dan brainstorming dengan *site inspector* serta profesional keamanan yang merupakan bagian dari kontraktor dan konsultan pengawas. Hasil pencatatan peristiwa kejadian bahaya K3 dapat ditemukan di tabel 1.

Tabel 1. Pengidentifikasi Potensi Bahaya (*Hazard Identification*).

No	Jenis Kegiatan	Sumber Kejadian Potensial	Daftar Kejadian Potensial
I	Preliminary Work	Pengerahan dan Pengembalian Alat	Bahaya ditabrak oleh alat
		Pembuatan bangunan oembantu berupa direksi keet	Bahaya tertusuk paku saat pembuatan Direksi Keet.
		Pembuatan Papan Informasi Proyek	Bahaya tangan terluka akibat terkena palu saat pembuatan Papan Informasi Proyek.
		Pemasangan Patok Kayu atau bowplank	Bahaya tangan terluka akibat alat kerja saat pemasangan Patok Kayu. Bahaya tertusuk paku saat pemasangan Patok Kayu.
II	Pekerjaan Tanah	Penggalian Tanah Secara Mekanis	Bahaya hasil galian longsor
			Bahaya tertumpuk alat konstruksi
			Bahaya tenggelam karena arus sungai
			Bahaya hanyut karena arus sungai
III	Pekerjaan Struktur Tanggul	Timbunan Tanah yang Dipadatkan	Bahaya tertimbun longsor Bahaya terkena alat berat
		Pembuatan Beton Pracetak K-350	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>
Bahaya terjatuh dari ketinggian			
Bahaya anggota tubuh terkena lontaran beton, pasir dan kerikil			
Bahaya anggota tubuh terkena besi			
Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>			
Bahaya ditimpa baja tulangan			
Bahaya bekesting beton lepas sehingga beton jatuh dan menimpa pekerja			
Pengadaan <i>Steel Interlock</i>	Bahaya bagian tubuh terkena baja tulangan		
	Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>		
Konstruksi Batang Penekan tinggi 6 m serta 2 m	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>		
	Bahaya badan/ kepala terkena lontaran beton, pasir dan kerikil		
	Bahaya bagian tubuh terkena baja tulangan		
	Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>		
	Bahaya tertimpa besi		
	Bahaya tertimpa beton		
Konstruksi Pre-Cast dengan mutu K-350	Bahaya tertimpa besi		
<i>Konstruksi Batang Pengunci</i>	Bahaya tertimpa besi		
Konstruksi Batang Penekan Tanggul	Bahaya tertimpa batang penekan		
Konstruksi beton injeksi mutu K-350	Bahaya tertimpa serpihan beton injeksi		
	Bahaya kekurangan cairan		
Konstruksi Pre-Cast Penutup Struktur Tanggul K-225	Bahaya tertimpa pre-cast		
	Bahaya kekurangan cairan		
Bekesting	Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting		
	Bahaya tertusuk benda tajam		
<i>Geotextile NonWoven</i>	Bahaya tangan terkena besi untuk menyambung		

No	Jenis Kegiatan	Sumber Kejadian Potensial	Daftar Kejadian Potensial
IV	Pekerjaan Penataan Tanggul	Dinding Bata Merah + <i>Coating</i>	Bahaya terpotong gerinda
			Bahaya sesak nafas akibat debu
			Bahaya mata terkena pecahan bata
			Bahaya terpapar zat kimia
		Konstruksi Pijakan Tangan dengan bata merah dan cairan pelapis	Bahaya terpotong gerinda
			Bahaya sesak nafas akibat debu
			Bahaya terpapar zat kimia
			Bahaya mata terkena pecahan bata saat potong
		Beton K-225	Bahaya ditimpa serpihan beton
			Bahaya kekurangan cairan
		Pembesian	Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>
			Bahaya tertusuk besi
			Bahaya tertimpa besi
		Pemasangan <i>Paving Block</i>	Bahaya terpotong gerinda
			Bahaya sesak nafas akibat debu
			Bahaya mata terkena pecahan paving
Bekesting	Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting		
	Bahaya ditimpa oleh bekesting		
	Bahaya tertusuk benda tajam		
Pemasangan 1 m Pipa GIP Dia 3"	Bahaya tangan terluka akibat alat kerja		
Beton Kanstin K225	Bahaya terpotong gerinda		
	Bahaya kaki tangan terluka akibat alat kerja		
	Bahaya sesak nafas akibat debu		
	Bahaya mata terkena pecahan beton		
Pemasangan Tiang Lampu	Bahaya terpeleset dari ketinggian		
Instalasi Kabel Lampu Taman	Bahaya tersengat listrik		
Cat Pipa <i>Railing</i>	Bahaya terpapar zat kimia		
Cat Beton <i>Railing</i>	Bahaya terkena zat kimia		
V	Pekerjaan <i>Jetty</i>	Galian Tanah dengan Alat	Bahaya galian longsor
			Bahaya tertimpa alat berat
			Bahaya tenggelam akibat aliran air
		Lapis Batu <i>Armour</i> Andesit Kelas A, W = 1500 kg	Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat
			Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>
			Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu
			Bahaya terjatuh dari ketinggian
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>
			Bahaya mata terkena pecahan batu
			Bahaya terkena <i>sling</i> pengangkat batu
			Bahaya tergerus gelombang laut
			Bahaya terkena alat berat
			Bahaya tertimpa alat berat
		Bahaya tenggelam akibat aliran air	
		Lapis Bawah Batu Andesit Kelas E, W = 150 kg	Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat
			Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>
			Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu
			Bahaya terjatuh dari ketinggian
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>
			Bahaya mata terkena pecahan batu
Bahaya terkena <i>sling</i> pengangkat batu			
Bahaya tergerus gelombang laut			
Bahaya terkena alat berat			
Lapis Dalam dengan Batu Andesit Tingkat H, Berat = 1 - 40 kg	Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat		
	Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>		



No	Jenis Kegiatan	Sumber Kejadian Potensial	Daftar Kejadian Potensial
			Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu
			Bahaya terjatuh dari ketinggian
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>
			Bahaya mata terkena pecahan batu
			Bahaya terkena sling pengangkat batu
			Bahaya tergerus gelombang laut
		Beton K-225	Bahaya terkena alat berat
			Bahaya ditimpa serpihan beton
			Bahaya kekurangan cairan
		Bekesting	Bahaya tergerus gelombang laut
			Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting
			Bahaya ditimpa bekesting
			Bahaya tertusuk benda tajam
			Bahaya tergerus gelombang laut

Tabel identifikasi bahaya di atas menunjukkan bahwa ada 101 bahaya potensial dari 34 sumber bahaya yang berbeda. Sumber risiko ini mencakup banyak pekerjaan rumit yang dilakukan dari awal proyek hingga akhir proyek. Hasil yang diidentifikasi di atas menunjukkan bahwa beberapa peristiwa berbahaya, seperti kehilangan air selama proses pengecoran di siang hari, memotong bar bender dan cutter, terpapar bahan kimia, dan jatuh dari ketinggian, serupa dengan hasil penelitian sebelumnya (Yuni, 2021). Ini disebabkan oleh fakta bahwa alat dan bahan yang digunakan adalah jenis alat dan bahan yang sama, serta fakta bahwa pekerjaan tersebut dilakukan di atas tanah dan pada siang hari. Selain itu, risiko K3 yang sama ditemukan karena banyaknya pekerjaan berulang di setiap pekerjaan pokok.

### 3.2. Penentuan Tingkat Kejadian Risiko

Proses penentuan tingkat kejadian risiko dilakukan untuk mengetahui tingkat risiko K3 yang terjadi dan menemukan risiko K3 yang signifikan. Dalam penilaian risiko ini, nilai modus frekuensi dan modus konsekuensi dikalikan berdasarkan jawaban responden. Hasil dari penentuan tingkat kejadian risiko dapat ditemukan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Penentuan Tingkat Kejadian Risiko.

No	Jenis Kegiatan	Daftar Kejadian Potensial	Nilai Terbanyak Untuk Kecepatan	Nilai Terbanyak Untuk Keperawatan	Hasil Perkalian Risiko	Penjelasan Tingkat Kejadian
<b>I</b>	<b>Preliminary Work</b>					
1	Pengerahan dan Pengembalian Alat	Bahaya ditabrak oleh alat	2	5	10	Sangat Tinggi
2	Pembuatan bangunan oembantu berupa direksi keet	Bahaya tertusuk paku saat pembuatan Direksi Keet.	3	2	6	Sedang
3	Pembuatan Papan Informasi Proyek	Bahaya tangan terluka akibat terkena palu saat pembuatan Papan Informasi Proyek.	3	2	6	Sedang
4	Pemasangan Patok Kayu atau bowplank	Bahaya tangan terluka akibat alat kerja saat pemasangan Patok Kayu.	3	2	6	Sedang
		Bahaya tertusuk paku saat pemasangan Patok Kayu.	3	2	6	Sedang
<b>II</b>	<b>Pekerjaan Tanah</b>					
1	Penggalian Tanah Secara Mekanis	Bahaya hasil galian longsor	4	3	12	Tinggi
		Bahaya tertumpuk alat konstruksi	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya tenggelam karena arus sungai	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya hanyut karena arus sungai	2	5	10	Sangat Tinggi
2	Timbunan Tanah yang Dipadatkan	Bahaya tertimbun longsor	2	4	8	Tinggi
		Bahaya terkena alat berat	2	5	10	Sangat Tinggi

No	Jenis Kegiatan	Daftar Kejadian Potensial	Nilai Terbanyak Untuk Kecepatan	Nilai Terbanyak Untuk Keparahan	Hasil Perkalian Risiko	Penjelasan Tingkat Kejadian
<b>III Pekerjaan Konstruksi Tanggul</b>						
1	Konstruksi Pre-Cast K-350	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terjatuh dari ketinggian	2	4	8	Tinggi
		Bahaya anggota tubuh terkena lontaran beton, pasir dan kerikil	3	2	6	Sedang
		Bahaya anggota tubuh terkena besi	3	2	6	Sedang
		Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya ditimpa baja tulangan	2	4	8	Tinggi
		Bahaya bekesting beton lepas sehingga beton jatuh dan menimpa pekerja	2	4	8	Tinggi
2	Pengadaan <i>Steel Interlock</i>	Bahaya bagian tubuh terkena baja tulangan	3	2	6	Sedang
		Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	3	4	12	Sangat Tinggi
3	Konstruksi Batang Penekan tinggi 6 m serta 2 m	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya badan/ kepala terkena lontaran beton, pasir dan kerikil	3	2	6	Sedang
		Bahaya bagian tubuh terkena baja tulangan	3	2	6	Sedang
		Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya tertimpa besi	2	4	8	Tinggi
5	Konstruksi Pre-Cast dengan mutu K-350	Bahaya tertimpa beton	2	4	8	Tinggi
6	Konstruksi Batang Pengunci	Bahaya anggota tubuh terkena besi	3	2	6	Sedang
		Bahaya tertimpa besi	2	4	8	Tinggi
7	Konstruksi Batang Penekan Tanggul	Bahaya tertimpa batang penekan	2	4	8	Tinggi
8	Konstruksi beton injeksi mutu K-350	Bahaya tertimpa serpihan beton injeksi	2	4	8	Tinggi
		Bahaya kekurangan cairan	5	2	10	Tinggi
9	Konstruksi Pre-Cast Penutup Struktur Tanggul K-225	Bahaya tertimpa pre-cast	2	4	8	Tinggi
		Bahaya kekurangan cairan	5	2	10	Tinggi
10	Bekesting	Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting	2	3	6	Sedang
		Bahaya tertusuk benda tajam	3	2	6	Sedang
11	<i>Geotextile NonWoven</i>	Bahaya tangan terkena besi untuk menyambung	3	2	6	Sedang
<b>IV Pekerjaan Penataan Tanggul</b>						
1	Dinding Bata Merah + <i>Coating</i>	Bahaya terpotong gerinda	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya sesak nafas akibat debu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan bata	3	3	9	Tinggi
		Bahaya terpapar zat kimia	5	2	10	Tinggi

No	Jenis Kegiatan	Daftar Kejadian Potensial	Nilai Terbanyak Untuk Kecepatan	Nilai Terbanyak Untuk Keperlahan	Hasil Perkalian Risiko	Penjelasan Tingkat Kejadian
2	Konstruksi Pijakan Tangan dengan bata merah dan cairan pelapis	Bahaya terpotong gerinda	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya sesak nafas akibat debu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya terpapar zat kimia	5	2	10	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan bata saat potong	3	3	9	Tinggi
3	Beton K-225	Bahaya ditimpa serpihan beton	2	4	8	Tinggi
		Bahaya kekurangan cairan	5	2	10	Tinggi
4	Pembesian	Bahaya tangan dan kaki terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya tertusuk besi	3	3	9	Tinggi
		Bahaya tertimpa besi	2	4	8	Tinggi
5	Pemasangan <i>Paving Block</i>	Bahaya terpotong gerinda	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya sesak nafas akibat debu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan paving	3	3	9	Tinggi
6	Bekesting	Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting	2	3	6	Sedang
		Bahaya ditimpa oleh bekesting	2	3	6	Sedang
		Bahaya tertusuk benda tajam	3	2	6	Sedang
7	Pemasangan 1 m Pipa GIP Dia 3"	Bahaya tangan terluka akibat alat kerja	3	2	6	Sedang
8	Beton Kanstin K225	Bahaya terpotong gerinda	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya kaki tangan terluka akibat alat kerja	3	2	6	Sedang
		Bahaya sesak nafas akibat debu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan beton	3	3	9	Tinggi
9	Pemasangan Tiang Lampu	Bahaya terpeleset dari ketinggian	2	4	8	Tinggi
10	Instalasi Kabel Lampu Taman	Bahaya tersengat listrik	2	4	8	Tinggi
11	Cat Pipa <i>Railing</i>	Bahaya terpapar zat kimia	5	2	10	Tinggi
12	Cat Beton <i>Railing</i>	Bahaya terkena zat kimia	5	2	10	Tinggi
<b>V Pekerjaan Jetty</b>						
1	Galian Tanah dengan Alat	Bahaya galian longsor	4	3	12	Tinggi
		Bahaya tertimpa alat berat	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya tenggelam akibat aliran air	2	5	10	Sangat Tinggi
2	Lapis Batu <i>Armour</i> Andesit Kelas A, W = 1500 kg	Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat	3	2	6	Sedang
		Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu	5	2	10	Tinggi
		Bahaya terjatuh dari ketinggian	2	4	8	Tinggi
		Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>	2	5	10	Sangat Tinggi

No	Jenis Kegiatan	Daftar Kejadian Potensial	Nilai Terbanyak Untuk Kekerapan	Nilai Terbanyak Untuk Keparahan	Hasil Perkalian Risiko	Penjelasan Tingkat Kejadian
		Bahaya mata terkena pecahan batu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya terkena sling pengangkat batu	3	3	9	Tinggi
		Bahaya tergerus gelombang laut	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terkena alat berat	2	5	10	Sangat Tinggi
3	Lapis Bawah Batu Andesit Kelas E, W = 150 kg	Bahaya tertimpa alat berat	3	2	6	Sedang
		Bahaya tenggelam akibat aliran air	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat	5	2	10	Tinggi
		Bahaya tangan dijepit armour	2	4	8	Tinggi
		Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terjatuh dari ketinggian	3	3	9	Tinggi
		Bahaya terkena jatuhnya batu armour	3	3	9	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan batu	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terkena sling pengangkat batu	2	5	10	Sangat Tinggi
4	Lapis Dalam dengan Batu Andesit Tingkat H, Berat = 1 - 40 kg	Bahaya tergerus gelombang laut	3	2	6	Sedang
		Bahaya terkena alat berat	3	4	12	Sangat Tinggi
		Bahaya anggota tubuh terkena batu atau alat	5	2	10	Tinggi
		Bahaya tangan dijepit armour	2	4	8	Tinggi
		Bahaya tangan memar sebagai akibat dari mengangkat batu	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terjatuh dari ketinggian	3	3	9	Tinggi
		Bahaya terkena jatuhnya batu armour	3	3	9	Tinggi
		Bahaya mata terkena pecahan batu	2	5	10	Sangat Tinggi
		Bahaya terkena sling pengangkat batu	2	5	10	Sangat Tinggi
5	Beton K-225	Bahaya tergerus gelombang laut	2	4	8	Tinggi
		Bahaya terkena alat berat	5	2	10	Tinggi
		Bahaya ditimpa serpihan beton	2	5	10	Sangat Tinggi
6	Bekesting	Bahaya kekurangan cairan	2	3	6	Sedang
		Bahaya tergerus gelombang laut	2	3	6	Sedang
		Bahaya anggota tubuh dijepit bekesting	3	2	6	Sedang
		Bahaya ditimpa bekesting	2	5	10	Sangat Tinggi

Berdasarkan hasil evaluasi risiko K3, terdapat 3 tingkat kejadian risiko yang berbeda, yakni tingkat Sangat Tinggi, Tinggi, dan Sedang. Terdapat 31 risiko dalam kategori Sangat Tinggi yang harus diberikan prioritas pertama dalam penanganan, karena risiko dalam kategori ini dapat menyebabkan cedera permanen dan cedera berat kepada para

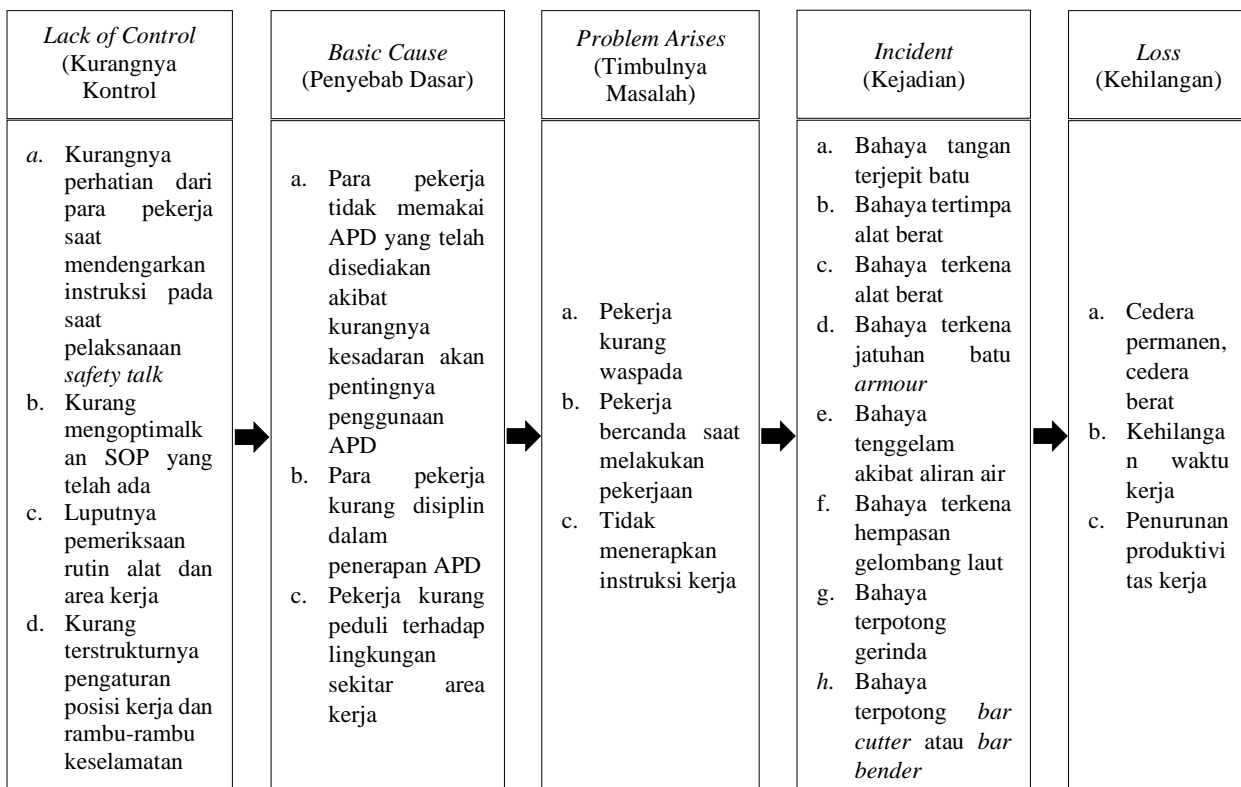
pekerja. Sementara itu, terdapat 46 risiko dalam kategori Tinggi yang memerlukan prioritas kedua dalam penanganan, karena risiko dalam kategori ini dapat menyebabkan cedera berat hingga cedera ringan. Terakhir, ada 24 risiko dalam kategori Sedang yang memerlukan prioritas ketiga dalam penanganan, karena risiko dalam kategori ini hanya dapat menyebabkan cedera ringan. Berdasarkan ketiga kategori tersebut, maka yang akan dilanjutkan untuk analisis penyebab kejadian risiko K3-nya adalah tingkat risiko Sangat Tinggi yang mengakibatkan cedera permanen hingga cedera berat dimana analisis menggunakan metode Domino.

### 3.3. Identifikasi Penyebab Risiko Sangat Tinggi dengan Metode Domino

Menurut teori *domino effect* kecelakaan kerja, kecelakaan terjadi melalui hubungan mata-rantai sebab akibat dari beberapa faktor penyebab kecelakaan kerja yang saling berhubungan sehingga menimbulkan kecelakaan serta kerugian lainnya. Penyebab kecelakaan kerja didasarkan atas hasil penilaian tingkat risiko yang memiliki nilai Sangat Tinggi, diantaranya:

- Pekerjaan *jetty* dengan risiko tangan terjepit batu, tertimpa alat berat, terkena alat berat, terkena jatuhnya batu *armour*, tenggelam akibat aliran air dan terkena hempasan gelombang laut.
- Pekerjaan penataan tanggul dengan risiko terpotong gerinda dan terpotong *bar cutter* atau *bar bender*.
- Pekerjaan struktur tanggul dengan risiko bahaya tangan dan kaki terpotong *bar cutter* atau *bar bender* dan bahaya ditabrak *truck mixer*.
- Pekerjaan tanah dengan risiko tertimpa alat berat dan terkena alat berat.
- Pekerjaan mobilisasi dan demobilisasi dengan risiko terkena alat berat.

Dari uraian di atas diketahui ada beberapa kejadian risiko yang sama untuk pekerjaan yang berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya item pekerjaan rinci yang sama meskipun memiliki sub pekerjaan yang berbeda. Berdasarkan hasil wawancara dengan *project manager* dan *team leader* diperoleh bahwa analisis Domino untuk pekerjaan yang memiliki tingkat risiko Sangat Tinggi hampir sama baik itu dari tingkat *management* hingga ke kehilangan atau *loss* yang terjadi. Adapun hasil analisis metode Domino akan ditunjukkan dalam gambar berikut.



Gambar 1. Diagram Domino Tingkat Risiko Sangat Tinggi.

Berdasarkan diagram Domino, penyebab paling pertama berasal dari pihak manajemen proyek (*top management*), karena manajemen merupakan puncak pimpinan yang menetapkan rencana pelaksanaan pekerjaan di lapangan. Akibat kurangnya kontrol oleh pihak manajemen maka muncul akibat kedua yaitu adanya penyebab dasar sebagai imbas dari kurangnya kontrol oleh pihak manajemen. Hal ini terus berlanjut sampai muncul masalah K3 kemudian terjadi kecelakaan dan kehilangan atau akibat yang muncul dari kecelakaan tersebut. Kelima penyebab ini saling berhubungan satu sama lain dan harus ditanggulangi melalui tindakan pengendalian risiko untuk menanggulangi dampak yang akan terjadi nantinya. Hasil yang ditunjukkan oleh diagram Domino di atas memiliki kemiripan dengan

hasil penelitian dari (Peruzzi, 2020) dan penelitian (Mulyani, 2016), di mana ada penyebab yang sama untuk “*lack of control*” yaitu kurangnya pengoptimalan SOP yang harusnya menjadi tanggung jawab dari manajemen proyek. Selain itu, kurangnya kedisiplinan pekerja dalam memakai APD juga turut menjadi penyebab yang sama untuk “*basic cause*” yang mana hal itu merupakan tanggung jawab dari pekerja itu sendiri dan petugas K3 proyek. Hal ini dikarenakan *site* lokasi proyek yang memanjang, kompleksnya item pekerjaan yang dilaksanakan tiap hari dan kurangnya personil dari pihak manajemen untuk memantau pelaksanaan pekerjaan tiap harinya sehingga ada ketidaksesuaian dengan rencana.

### 3.4. Pengendalian Risiko (*Risk Control*)

Penetapan skala prioritas didasarkan atas item pekerjaan yang mempunyai tingkat risiko K3 prioritas 1 (risiko Sangat Tinggi), prioritas 2 (risiko *Tinggi*), dan prioritas 3 (risiko *Sedang*). Jika tingkat risiko dinyatakan tinggi, maka item pekerjaan tersebut menjadi prioritas utama (peringkat 1) untuk dilakukan pengendalian. Pengendalian risiko prioritas pertama dengan sistem pengendalian risiko yang mencakup penghapusan, pergantian, pengawasan teknis, administratif, dan penyediaan APD.

- a. Pekerjaan *jetty* dengan risiko tangan terjepit batu, tertimpa alat berat, terkena alat berat, terkena jatuhnya batu *armour*, tenggelam akibat aliran air dan terkena hempasan gelombang laut.
- b. Pekerjaan penataan tanggul dengan risiko terpotong gerinda dan terpotong *bar cutter* atau *bar bender*.
- c. Pekerjaan struktur tanggul dengan risiko bahaya tangan dan kaki terpotong *bar cutter* atau *bar bender* dan bahaya ditabrak *truck mixer*.
- d. Pekerjaan tanah dengan risiko tertimpa alat berat dan terkena alat berat.
- e. Pekerjaan mobilisasi dan demobilisasi dengan risiko terkena alat berat.

Adapun pengendalian risiko ditunjukkan ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 3. Pengendalian Risiko (*Risk Control*).

No	Item Pekerjaan	Sumber Risiko Prioritas Utama 1	Identifikasi Bahaya	Dampak	Pengendalian Risiko
I	Pekerjaan <i>Jetty</i>				
		Galian Tanah dengan Alat	Bahaya tertimpa alat berat	Cedera permanen, cedera berat	Membicarakan pertemuan rutin (TBM), <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, penggunaan operator yang telah bersertifikat, dan pengajuan izin kerja
			Bahaya tenggelam akibat aliran air	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja
		Lapis Batu <i>Armour</i> Andesit Kelas A, W = 1500 kg	Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, ijin kerja, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)(sarung tangan)
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	Membicarakan pertemuan rutin (TBM), <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, penggunaan operator yang telah bersertifikat, dan pengajuan izin kerja dan Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) (sarung tangan)
			Bahaya tergerus gelombang laut	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja
			Bahaya terkena alat berat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja
		Lapis <i>Underlayer</i> Andesite Kelas E, W = 150 kg	Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, ijin kerja, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)(sarung tangan)

No	Item Pekerjaan	Sumber Risiko Prioritas Utama 1	Identifikasi Bahaya	Dampak	Pengendalian Risiko	
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, ijin kerja, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)(sarung tangan)</i>	
			Bahaya tergerus gelombang laut	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja</i>	
			Bahaya terkena alat berat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja</i>	
		Lapis Dalam dengan Batu Andesit Tingkat H, Berat = 1 - 40 kg	Bahaya tangan dijepit <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, ijin kerja, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)(sarung tangan)</i>	
			Bahaya terkena jatuhnya batu <i>armour</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, menata lingkungan kerja agar rapi, penyusunan metode kerja yang sesuai, ijin kerja, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)(sarung tangan)</i>	
			Bahaya tergerus gelombang laut	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja</i>	
			Bahaya terkena alat berat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja</i>	
			Beton K-225	Bahaya tergerus gelombang laut	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja</i>
			Bekesting	Bahaya tergerus gelombang laut	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM), safety talk, pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja</i>
<b>II</b>	<b>Pekerjaan Penataan Tanggul</b>					
		Dinding Bata Merah + <i>Coating</i>	Bahaya terpotong gerinda	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk, pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)</i>	
		Pilar <i>Hand Rail</i> dengan Tempel Bata Merah Cetak + <i>Coating</i>	Bahaya terpotong gerinda	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk, pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)</i>	
		Pembesian	Bahaya terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk, pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)</i>	
		Pemasangan <i>Paving Block</i>	Bahaya terpotong gerinda	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk, pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)</i>	



No	Item Pekerjaan	Sumber Risiko Prioritas Utama 1	Identifikasi Bahaya	Dampak	Pengendalian Risiko
		Beton Kanstin K225	Bahaya terpotong gerinda	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)
<b>III</b>	<b>Pekerjaan Konstruksi Tanggul</b>				
		Konstruksi Pre-Cast K-350	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja
			Bahaya terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)
		Pengadaan <i>Steel Interlock</i>	Bahaya terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)
		Pembuatan Batang Tekan 6 m dan 2 m	Bahaya ditabrak <i>truck mixer</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja
			Bahaya terpotong <i>bar cutter</i> atau <i>bar bender</i>	Cedera permanen, cedera berat	<i>Safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan, masker, helm)
<b>IV</b>	<b>Pekerjaan Tanah</b>				
		Galian Tanah dengan Alat	Bahaya tertimpa alat berat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja
			Bahaya tenggelam akibat aliran air	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja
			Bahaya hanyut akibat aliran air	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, bekerja saat air surut, penyusunan metode kerja yang sesuai, pengajuan izin kerja
		Timbunan Tanah Dipadatkan	Bahaya terkena alat berat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja
<b>V</b>	<b>Pekerjaan Persiapan</b>				
		Mobilisasi dan Demobilisasi	Bahaya ditabrak alat	Cedera permanen, cedera berat	<i>Membicarakan pertemuan rutin (TBM)</i> , <i>safety talk</i> , pengaturan posisi kerja, pengaturan posisi alat, penyusunan metode kerja yang sesuai, menggunakan operator yang bersertifikat, pengajuan izin kerja

Berdasarkan pengendalian risiko yang telah diuraikan di atas, maka dapat ditarik garis besar bahwa hal paling pertama yang harus dilakukan adalah *Membicarakan pertemuan rutin (TBM)* dan *safety talk* kepada para pekerja sebelum memulai sebuah pekerjaan. Hal ini dilakukan untuk mengingatkan kepada personil dan pekerja tentang potensi bahaya serta penggunaan APD dan kepedulian terhadap APK menjadi kunci untuk meminimalkan kemungkinan kejadian risiko K3. Tindakan pengendalian selanjutnya seperti pengaturan posisi alat dan kerja serta metode pelaksanaan yang tepat merupakan tanggung jawab dari pihak manajemen proyek sehingga perlu dimaksimalkan peran dari petugas K3 di lapangan untuk mengawasi penerapan K3 di lapangan.

## Kesimpulan

Penelitian menunjukkan 101 identifikasi bahaya dengan 34 sumber bahaya, di mana kategori Sangat Tinggi 31 risiko, kategori *Tinggi* 46 risiko dan kategori Sedang 24 risiko. Faktor penyebab risiko tertinggi adalah kurangnya perhatian pekerja saat *safety talk*, kurang mengoptimalkan standar operasional prosedur kerja, luputnya pemeriksaan rutin alat dan area kerja, kurang terstrukturanya pengaturan posisi kerja dan rambu keselamatan, pekerja tidak memakai alat pelindung diri, pekerja kurang disiplin dalam penerapan alat pelindung diri, pekerja kurang peduli terhadap lingkungan area kerja, pekerja kurang waspada, pekerja bercanda saat melakukan pekerjaan dan tidak menerapkan instruksi kerja. Pengendalian risiko dengan *tools box meeting*, mengatur posisi dan alat kerja, ijin kerja dan alat pelindung diri.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Nindya Karya (Persero) atas kesediaannya untuk memberikan data dan bantuan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Adha, A. (2022). Analisis Risiko Kecelakaan Kerja pada Pekerja Proyek Pembangunan Perpipaian Air Limbah Kota Pekanbaru. *Media Kesmas (Public Helath Media)*, 88-93.
- Ervianto, W. I. (2005). *Manajemen Proyek Konstruksi*. Yogyakarta: CV. Andi Offset.
- Fatchiyati, A. (2019). Analisis Manajemen Risiko Bendung Gerak Kanal Banjir Barat Kota Semarang dan Dampaknya Terhadap Lingkungan. *Teknika*, 1-10.
- Jaya, N. M. (2021). Manajemen Risiko K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja) pada Proyek Pembangunan Rumah Sakit bali Mandara. *Spektran*, 29-37.
- Mahdi, M. I. (2022, April 28). *DataIndonesia.id*. Retrieved from DataIndonesia.id: <https://dataindonesia.id/sektor-riil/detail/kasus-kecelakaan-kerja-di-indonesia-alami-tren-meningkat>
- Mulyani, S. (2016). *Analisa Risiko Kecelakaan Kerja dengan Menggunakan Metode Domino pada Pembangunan Proyek Apartemen Grand Taman Melati Margonda-Depok*. Surabaya: Institut Teknologi Surabaya.
- Norhen, I. N. (2015). *Pengantar Analisis dan Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi*. Denpasar: Udayana University Press.
- Peruzzi, A. (2020). Risk Assessment Kecelakaan Kerja dengan Menggunakan Metode Domino pada Proyek Apartemen Grand Dharmahusada Lagoon. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 103-116.
- Rijaluddin, K. (2015). Sistem Keselamatan Kerja pada Proyek Normalisasi Sungai. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan (Sustainable Technology Journal)*, 21-25.
- Setiawan, S. d. (2017). Rencana Tindak Lanjut Terhadap Potensi Bahaya Kecelakaan pada PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia. *Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI XI)*, (pp. 286-293). Lombok.
- Soeharto, I. I. (2001). *Manajemen Proyek (Dari Konseptual sampai Operasional) Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Tagueha, W. P. (2018). Manajemen Risiko K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja) pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Laboratorium Fakultas Teknik Unsrat). *Jurnal Sipil Statik*, 907-916.
- Tarwaka. (2008). *Keselamatan dan Kesehatan Kerja “ Manajemen dan Implementasi K3 di Tempat Kerja”*. Surakarta: Harapan Press.
- Triswandana, I. W. (2020). Penilaian Risiko K3 Konstruksi dengan Metode Hirarc. *Ukarst*, 97-108.
- Wiguna, S. (2018). *Identifikasi Potensi Bahaya pada Pekerja Proyek Pengendalian Banjir Sungai Asahan Paket 2 PT. Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk Tahun 2018*. Sumatera Utara: Universitas Sumatera Utara.
- Yuni, N. K. (2021). Risiko K3 pada Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Gedung Swasta. *Paduraksa*, 317-324.

## Antena Helix Mode Axial untuk Frekuensi Kerja Radar S-Band

M. Reza Hidayat<sup>1</sup>, Aditya Febryana<sup>1</sup>, Nivika Tiffany Somantri<sup>1</sup>, dan Yussi Perdana Saputera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

<sup>2</sup>Program Doktorat Ketahanan, Pascasarjana Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

[mreza@lecture.unjani.ac.id](mailto:mreza@lecture.unjani.ac.id), [febryanaaditya16@gmail.com](mailto:febryanaaditya16@gmail.com), [nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id](mailto:nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id), [yussips@gmail.com](mailto:yussips@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini merancang sebuah antena helix mode axial dengan frekuensi kerja yang digunakan sebesar 2,1 GHz yang terdapat pada rentang frekuensi radar S-Band, yang memiliki nilai *Return loss*  $\leq -10$  dB dan *VSWR*  $\leq 1,3$ . Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software CST studio suite 2020* dengan merancang antena helix dari hasil perhitungan hingga dilakukan optimasi pada struktur antena helix, yaitu jarak antar lilitan, jumlah lilitan, diameter lilitan, dan diameter *ground plane* sampai hasil simulasi sesuai dengan spesifikasi parameter yang diinginkan. Berdasarkan hasil akhir parameter *Return loss* dan *VSWR* sudah memenuhi standar spesifikasi yang dirancang, dari hasil simulasi antena helix mode axial didapat hasil yaitu pada *Return loss* -22 dB dan pada nilai *VSWR* didapat 1,17. Adapun hasil dari pengukuran antena helix mode axial didapat hasil yang sama pada *Return loss* -22 dB dan pada *VSWR* 1,17 tetapi nilai frekuensi yang digunakan pada pengukuran bergeser menjadi 2,4 GHz, hal ini dikarenakan pita frekuensi s-band dapat bekerja pada 2 GHz sampai dengan 4 GHz.

Kata kunci: antena helix, radar S-Band, *software CST Studio Suite 2020*, *return loss*, *VSWR*

### Abstract

This study designed an axial mode helix antenna with a working frequency used of 2.1 GHz, which has a return loss value of  $\leq -10$  dB and *VSWR*  $\leq 1.3$ . The simulation was carried out using the *CST studio suite 2020* software by designing a helix antenna from the calculation results to optimization of the helix antenna structure, namely the distance between the windings, the number of windings, the diameter of the windings, and the diameter of the ground plane until the simulation results are in accordance with the specifications of the desired parameters. Based on the final results of the return loss parameters and *VSWR* has met the designed specification standards, from the simulation results of the axial mode helix antenna, the results were obtained, namely at a return loss of -22 dB and at a *VSWR* value obtained 1.17. The results of the measurement of the axial mode helix antenna obtained the same result at a return loss of -22 dB and at *VSWR* 1.17 but the frequency value used in the measurement shifted to 2.45 GHz, this is not a problem because the s-band frequency can work from 2 GHz to 4 GHz.

Keywords: helix antenna, S-Band radar, *CST studio suite software 2020*, *return loss*, *VSWR*

## 1. Pendahuluan

Antena helix dapat beroperasi dalam satu dari dua mode utama, yaitu mode normal atau mode *axial* (Fauzi & Cahyadi, 2020). Antena helix mode axial dan *patch meanderline DGS* dipergunakan untuk daerah rural dengan berbasis IoT dan dari hasil penelitian ini antena helix mode axial ini memiliki dimensi besar yang menyerupai pegas dan sifat pola radiasinya *directional* (terarah) (Setiabudi & Wicaksono, 2018). Adapun antena helix bekerja pada X-Band 8,2 GHz dalam hal *gain*, *Right Handed Circular Polarization* (RHCP) akan lebih baik dibandingkan dengan polarisasi *Left Handed Circular Polarization* (LHCP) (Faizal, 2016). Antena helix mempunyai kemampuan mengatasi rotasi Faraday akibat putaran ion yang ada di atmosfer sangat diperlukan oleh antena penerima S-Band ini sehingga antena tersebut harus berpolarisasi sirkular (Ahmadi et al., 2017). Selain itu, antena helix bisa digunakan sebagai antena pengganti pada *wireless LAN card* dan bekerja pada frekuensi 2,4 GHz (Mughtar & Firmansyah, 2019). Pada mode axial, antena helix sangat baik menghasilkan pola radiasi *unidirectional* (Aztris & Wijanto, 2019). Beberapa contoh penelitian tersebut belum menerapkan frekuensi kerja pada radar s-band dalam menyimulasikan dan merancang antena helix mode axial. Oleh karena itu pada penelitian ditargetkan penggunaan frekuensi kerja radar s-band guna dapat mencapai keluaran *return loss* yang dibuat memiliki nilai  $\leq -10$  dB dan *VSWR*  $\leq 1,3$  (Dwijayatno et al., 2014).

### Info Makalah:

Dikirim : 09-19-22;  
Revisi 1 : 03-16-23;  
Revisi 2 : 05-13-23;  
Diterima : 06-05-23.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 822-1524-4637  
e-mail : [mreza@lecture.unjani.ac.id](mailto:mreza@lecture.unjani.ac.id)

Pada penelitian ini melakukan implementasi pada frekuensi kerja radar s-band, yaitu 2,1 GHz dan mengamati parameter *S1,1* dan *VSWR*. Proses pengujian dilakukan dengan mencoba beberapa rancangan dan membandingkan hasilnya dan mengimplementasikannya pada alat dengan mengambil dari hasil simulasi yang menunjukkan hasil paling baik.

## 2. Metode

Metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu merancang dan menyimulasikan antena helix mode axial untuk frekuensi kerja radar s-

band, lalu dilakukan pembuatan dan pengujian (realisasi alat) (Susanto, 2018). Proses perancangan dan simulasinya dilakukan dengan menggunakan *software* CST *studio suite* 2020 dan pengukuran alat yang telah dibuat yaitu pada VNA (*Vector Network Analyzer*) (Maharani, 2018).

### 2.1. Parameter Antena Helix

Dalam perancangan antena helix, ada parameter-parameter yang harus kita tentukan seperti panjang gelombang, diameter antena, *circumference* antena, *pitch angle*, *axial length*, jarak antar lilitan, dan jumlah lilitan (Balannis, n.d.).

#### a. Panjang Gelombang

Panjang gelombang ini digunakan sebagai acuan untuk perhitungan komponen lain dan harus diprioritaskan. Panjang gelombang ini dapat dihitung dengan rumus (Martripagelardo, Dedy Suryadi, F Trias Pontia W, Fitri Imansyah, 2019) :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

#### b. Diameter Area

Dari perhitungan keliling lingkaran antena helix, sekarang kita dapat mencari nilai diameter antena helix yang akan dirancang dengan rumus (Muthiah, Amalina; Nugroho, Bambang Setia; Wahyu, 2018):

$$D = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2)$$

#### c. Axial Length

*Axial length* merupakan panjang total dari antena di mana jumlah dari lilitan antena dikalikan dengan jarak antar lilitan antena, dan dapat dibidang dengan rumus:

$$A = n \times S \quad (3)$$

#### d. Jarak antar Lilitan

Sebelum menentukan nilai dari jarak antar lilitan (S), kita tentukan dulu nilai *circumference*, C sebagai berikut (Rafsyam et al., 2018):

$$C = \pi \times D \quad (4)$$

Dengan jarak antar lilitan:

$$S = 0,25C \quad (5)$$

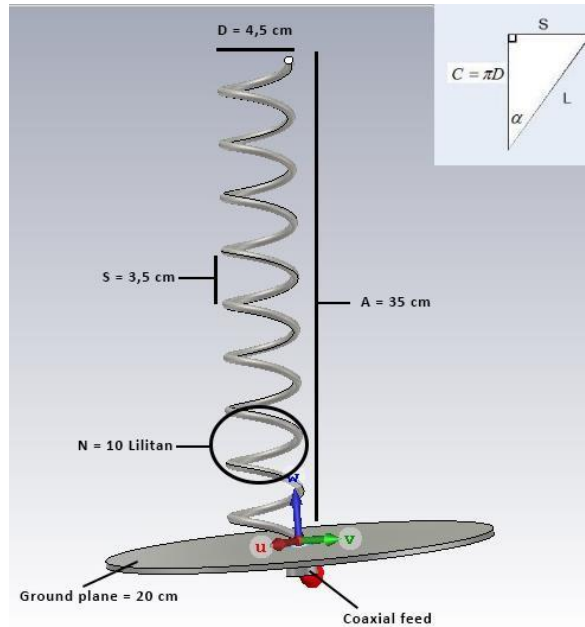
#### e. Jumlah Lilitan

Tidak ada batasan untuk menentukan jumlah lilitan (N) antena heliks, tetapi beberapa sumber menyatakan nilai  $N > 3$  atau lebih dari 3 lilitan. Banyaknya lilitan berpengaruh besar terhadap gain dan HPBW (Lestari et al., 2012). Semakin tinggi jumlah lilitan, semakin tinggi gain yang dicapai dan semakin sempit sudut HPBW yang dicapai, dan sebaliknya (Eska & Setiabudi, 2015).

### 2.2. Rancangan Awal Antena Helix Mode Axial

Perancangan antena ini dapat dikelompokkan menjadi dua tahapan. Adapun standar nilai yang ditargetkan untuk antena yang dirancang memiliki nilai S11 di minimal -10 dB serta VSWR < 2 pada frekuensi radar *S-Band* yaitu 2.1 GHz Pada tahap pertama dengan menggunakan *Software Computer Simulation Technology* (CST) 2020, kegiatan yang dilakukan pada tahap ini untuk penentuan spesifikasi yang akan dirancang. Hasil yang diperoleh dari tahapan pertama selanjutnya, dilanjutkan pada tahapan kedua. Pada tahapan kedua ini, setelah antena dirancang lalu antena difabrikasi. Antena yang dipilih adalah antena helix mode axial dengan menggunakan bahan tembaga berukuran 0,6 mm sebagai lilitan antena, untuk lebih memperjelas seperti apa antena helix yang akan dibuat ini, penulis akan memaparkan beberapa faktor utama dari perancangan antena helix ini, dapat dilihat pada Gambar 1. *Circumference* (C) ini merupakan keliling lingkaran dari antena helix mode axial, nilai C bisa didapatkan dengan syarat  $0,75\lambda < C < 1,3\lambda$ , pada perancangan awal diameter antena helix mode axial (D) dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (1) yang bernilai 4,5 cm, Jumlah lilitan ini menggunakan sebanyak 10 lilitan dan dapat dinyatakan

sebagai (N), Tinggi total antena helix dapat dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (2) yang bernilai 35 cm. Pada diameter antena helix berhubungan erat dengan panjang gelombangnya, jarak antar lilitan (S) biasanya diambil dari ¼ nilai *circumference* (C) mempengaruhi radiasi dari antena helix yang akan dibuat dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (3) dan (4), jarak antar lilitan ini bernilai 3,5 cm, *Ground Plane* ini berbentuk lingkaran yang bernilai 20 cm, nilai minimal diameter *Ground Plane* antena helix adalah  $0,75\lambda$ , dan ada kabel *coaxial*, kabel yang digunakan bernilai 50 Ohm untuk menghubungkan antena helix dengan alat ukur.



Gambar 1. Rancangan Awal Antena Helix Mode Axial.

### 3. Hasil dan Pembahasan

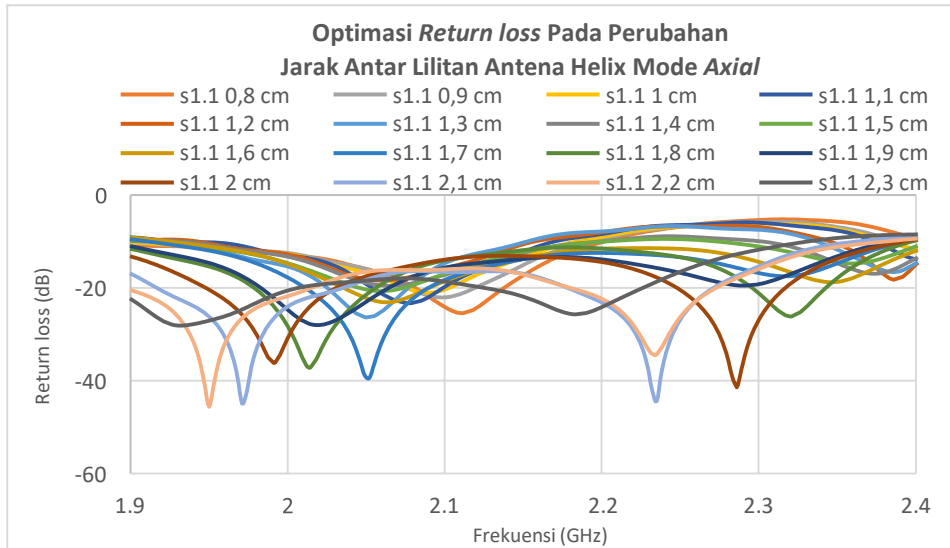
Sebelum antena difabrikasi dilakukan beberapa tahapan optimasi untuk antena helix mode axial untuk frekuensi kerja radar *s-band*. Langkah ini bertujuan agar antena helix yang belum difabrikasi, mendapatkan hasil yang mendekati standar dan akan menjadi acuan terhadap tahap rancangan akhir antena helix mode axial, pada analisa optimasi akhir ini fokus utama yang akan diamati, yaitu nilai *return loss* dan VSWR, dan bekerja pada frekuensi 2,1 GHz.

#### 3.1. Hasil Dan Analisa Antena Helix Mode Axial dengan Mengubah Jarak Antar Lilitan

Tabel 1. Hasil Perubahan Jarak Antar Lilitan Antena Helix Mode Axial.

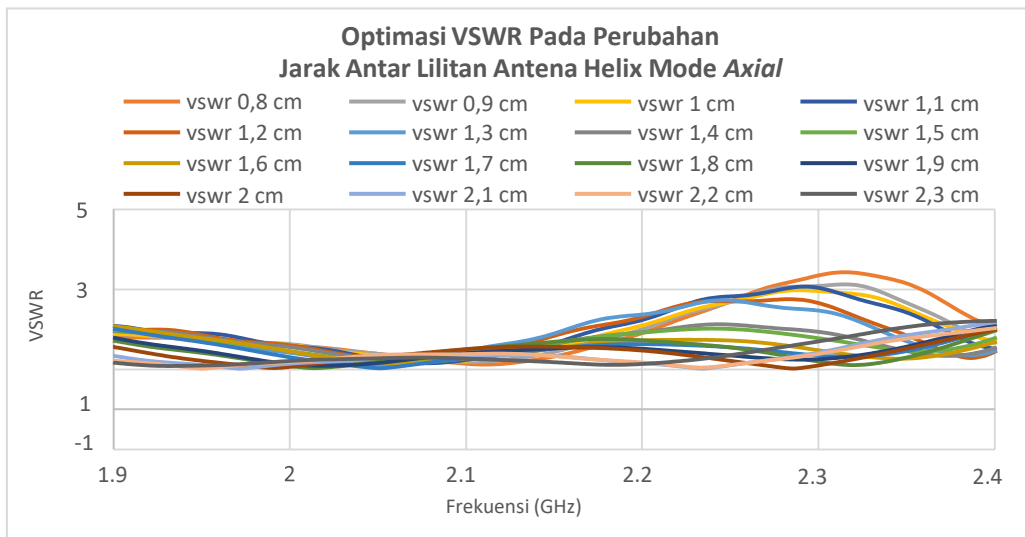
No	Jarak Antar Lilitan (cm)	Frekuensi (GHz)	Return loss (dB)	VSWR
1	0,8	2,1	-24,12	1,1326
2	0,9	2,1	-22,05	1,1713
3	1	2,1	-20,40	1,2111
4	1,1	2,1	-19,77	1,2285
5	1,2	2,1	-15,79	1,3872
6	1,3	2,1	-14,69	1,4515
7	1,4	2,1	-17,23	1,3188
8	1,5	2,1	-17	1,3292
9	1,6	2,1	-18,57	1,2669
10	1,7	2,1	-18,29	1,2772
11	1,8	2,1	-14,09	1,4919
12	1,9	2,1	-15,65	1,3952
13	2	2,1	-13,94	1,5022
14	2,1	2,1	-16,57	1,3481
15	2,2	2,1	-16,05	1,3737
16	2,3	2,1	-18,64	1,2645

Hasil yang telah didapat, melalui Tabel 1 tersebut terlihat bahwa semua nilai parameter *return loss* yang dihasilkan di bawah kurang dari -10 dB, sama halnya dengan *return loss*, pada parameter VSWR semua dari tahapan optimasi bernilai kurang dari 2. Pada perubahan jarak antar lilitan berukuran 0,8 cm, 0,9 cm, dan 1 cm, hasil optimasi ini memiliki nilai parameter VSWR yang mendekati dengan spesifikasi antenna yang telah dibutuhkan, yaitu 1,2.



Gambar 2. Perubahan *Return loss* Jarak Antar Lilitan Antena Helix Mode Axial.

Dapat diamati pada Gambar 2 grafik perubahan jarak antar lilitan antenna helix mode axial terhadap parameter *return loss* melalui grafik tersebut menghasilkan dua kali resonansi. Pada hasil mengubah jarak antar lilitan ini juga frekuensi puncak yang didapat rata-rata bergeser semakin tinggi menandakan bahwa nilai *return loss* akan semakin tinggi. Pada tahap optimasi mengubah jarak lilitan hasil yang digunakan untuk merancang antenna helix mode axial dengan nilai sebesar 0,9 cm.



Gambar 3. Perubahan VSWR Jarak Antar Lilitan Antena Helix Mode Axial

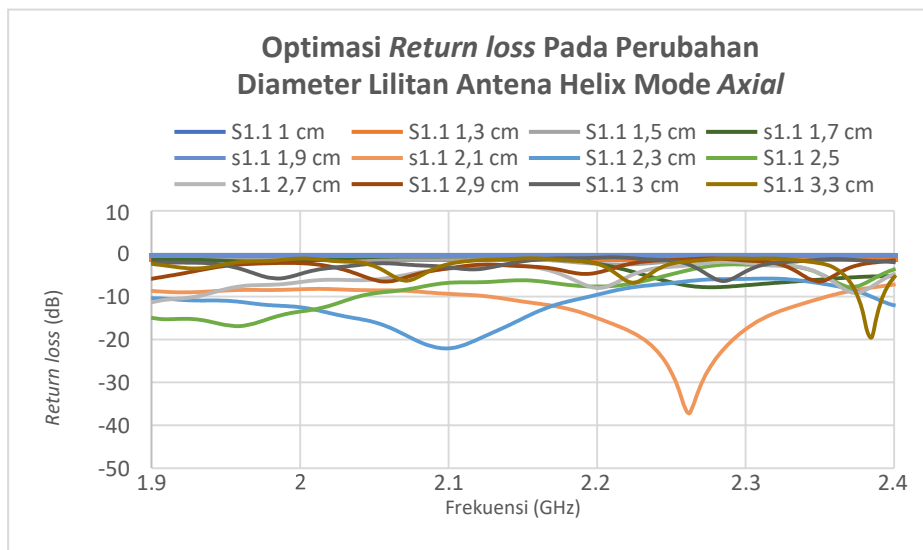
Dapat diamati pada Gambar 3 grafik perubahan jarak antar lilitan dari antenna helix mode axial terhadap parameter *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), melalui grafik tersebut hasil dari simulasi yang diamati merupakan pengaruh terhadap frekuensi 2,1 GHz nilai yang didapat naik dan turun, hal ini dikarenakan adanya arus listrik di dalam kawat tembaga dan adanya induksi magnetik pada spiral antenna. Dalam hasil VSWR terhadap frekuensi kerja 2,1 GHz di mana perubahan hasil nilai menjadi semakin besar. Walaupun demikian semua hasil dari nilai VSWR yang didapat memenuhi spesifikasi parameter yang dibutuhkan, di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah jarak antar lilitan antenna helix mode axial, yaitu dengan jarak antar lilitan yang berukuran 0,9 cm.

### 3.2. Hasil Dan Analisa Antena Helix Mode Axial Dengan Merubah Diameter Lilitan

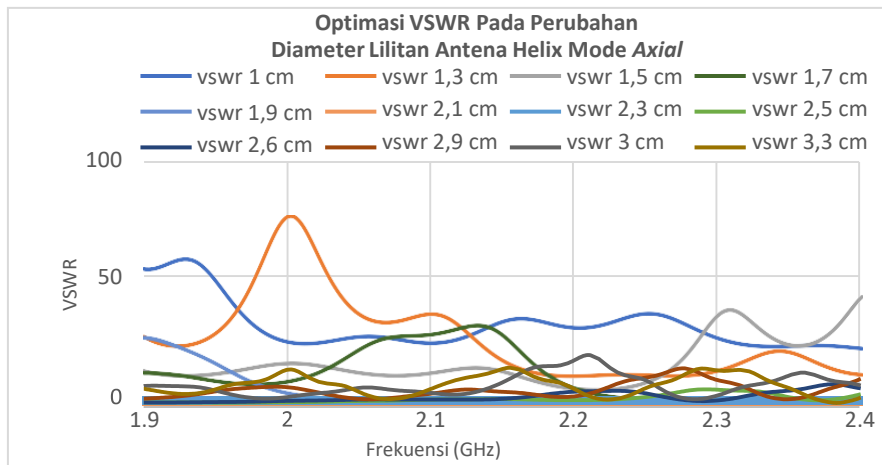
Tabel 2. Hasil Perubahan Diameter Lilitan Antena Helix Mode Axial.

No	Diameter Antena Helix (cm)	Frekuensi (GHz)	Return loss (dB)	VSWR
1	1	2,1	-0,6357	27,3354
2	1,3	2,1	-0,4354	39,9038
3	1,5	2,1	-1,2173	14,2935
4	1,7	2,1	-0,5597	31,0442
5	1,9	2,1	-7,7374	2,3917
6	2,1	2,1	-9,3139	2,0405
7	2,3	2,1	-22,05	1,1713
8	2,5	2,1	-6,7419	2,7047
9	2,7	2,1	-3,4734	5,0677
10	2,9	2,1	-3,3491	5,2510
11	3,1	2,1	-0,9467	18,3662
12	3,3	2,1	-2,4046	4,8552

Meninjau dari data perubahan diameter lilitan yang bekerja pada frekuensi 2,1 GHz, dengan menggunakan perbedaan jarak antar ukuran 0,2 cm dan dari hasil yang telah didapat, melalui Tabel 2 tersebut terlihat bahwa hampir semua nilai parameter *return loss* yang dihasilkan di atas tidak memenuhi standar parameter, yaitu kurang dari -10 dB, sama halnya dengan *return loss*, pada parameter VSWR hampir semua dari tahapan optimasi ini tidak memenuhi standar parameter yang bernilai kurang dari 2, dari 12 percobaan optimasi ini hanya terdapat satu yang hasilnya memenuhi standar parameter yang dibutuhkan, yaitu pada diameter lilitan berukuran 2,3 cm.

Gambar 4. Perubahan *Return loss* Diameter Lilitan Antena Helix Mode Axial

Dapat diamati pada Gambar 4 grafik perubahan diameter antena helix mode axial terhadap parameter *return loss*, melalui grafik tersebut hasil dari simulasi yang diamati, pada hasil optimasi perubahan ukuran diameter antena helix dengan frekuensi 2,1 GHz pengaruh yang didapat pada nilai *return loss* optimasi ini menghasilkan nilai yang tidak beraturan atau naik turun tetapi pada ukuran 2,1 cm terdapat pergeseran frekuensi menjadi ke 2,27 GHz dan juga hasil parameter *return loss* lebih baik dari frekuensi 2,1 GHz.



Gambar 5. Perubahan VSWR Diameter Lilitan Antena Helix Mode Axial.

Dapat diamati pada Gambar 5 grafik perubahan diameter lilitan dari antena helix mode axial terhadap parameter *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), melalui grafik tersebut didapat hasil dari simulasi yang diamati merupakan pengaruh terhadap frekuensi 2,1 GHz. Dalam hasil VSWR terhadap frekuensi kerja 2,1 GHz didapat pada perubahan hasil nilai semakin buruk, di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah jarak antar lilitan antena helix mode axial, yaitu dengan diameter lilitan yang berukuran 2,3 cm dengan nilai VSWR sebesar 1,17.

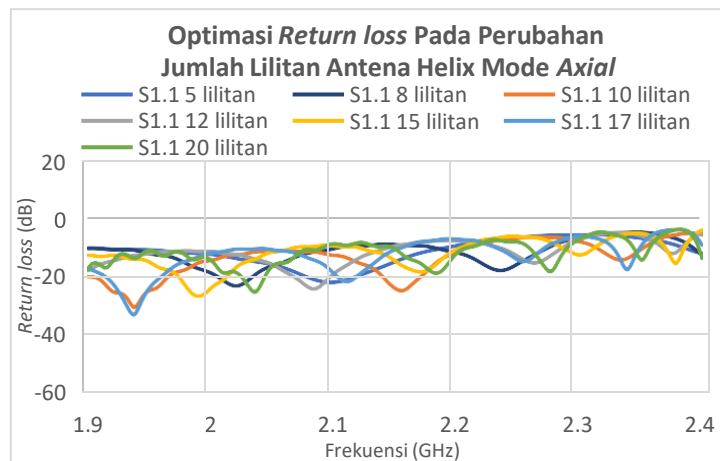
**3.3. Hasil Dan Analisa Antena Helix Mode Axial dengan Merubah Jumlah Lilitan**

Tabel 3. Hasil Perubahan Jumlah Lilitan Antena Helix Mode Axial.

No	Jumlah Lilitan (N)	Frekuensi (GHz)	Return Loss	VSWR
1	5	2,1	-22,05	1,1713
2	8	2,1	-10,57	1,8410
3	10	2,1	-12,78	1,5955
4	12	2,1	-19,28	1,2437
5	15	2,1	-9,49	2,0076
6	17	2,1	-18,83	1,2582
7	20	2,1	-8,86	2,1259

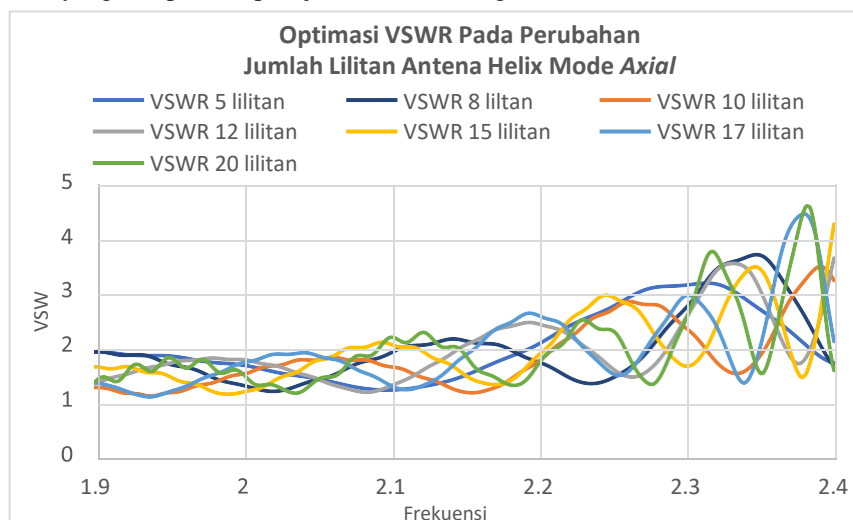
Meninjau dari data perubahan jumlah lilitan yang bekerja pada frekuensi 2,1 GHz, dengan menggunakan perbedaan antar lilitan berjumlah 2 sampai 3 lilitan dan dari hasil yang telah didapat, melalui Tabel 3 tersebut terlihat bahwa optimasi dengan jumlah 15 dan 20 lilitan tidak memenuhi nilai standar dari parameter *return loss*, yaitu kurang dari -10 dB, sama halnya dengan *return loss*, tetapi pada nilai parameter VSWR terdapat 4 hasil dari tahapan optimasi ini tidak memenuhi standar parameter yang bernilai kurang dari 2, yaitu dengan jumlah 8,10,15, dan 20 lilitan. Dari 7 percobaan optimasi ini hanya terdapat satu yang hasilnya memenuhi standar parameter yang dibutuhkan, yaitu dengan jumlah 5 lilitan.





Gambar 6. Perubahan *Return Loss* Jumlah Lilitan Antena Helix Mode Axial.

Dapat diamati pada Gambar 6 grafik perubahan jumlah lilitan antena helix mode axial terhadap parameter *return loss*, melalui grafik tersebut hasil dari simulasi yang diamati merupakan pengaruh terhadap frekuensinya, diketahui dengan semakin banyak jumlah lilitan yang digunakan maka jumlah pita frekuensi dari nilai parameter *return loss* yang dihasilkan akan semakin bertambah juga, terdapat hasil parameter uji *return loss* yang memenuhi standar spesifikasi pada frekuensi 2,1 GHz, di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah jumlah lilitan antena helix mode axial parameter yang didapat berupa 5 jumlah lilitan dengan nilai -22,05 dB.



Gambar 7. Perubahan VSWR Jumlah Lilitan Antena Helix Mode Axial.

Dapat diamati pada Gambar 7 grafik perubahan jumlah lilitan antena helix mode axial terhadap parameter *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), melalui grafik tersebut, hasil yang didapat dari simulasi yang diamati merupakan pengaruh terhadap frekuensi 2,1 GHz. Dalam hasil VSWR terhadap frekuensi kerja 2,1 GHz didapat perubahan dari hasil nilai secara acak, di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah jumlah lilitan antena helix mode axial parameter yang didapat berupa 5 jumlah lilitan.

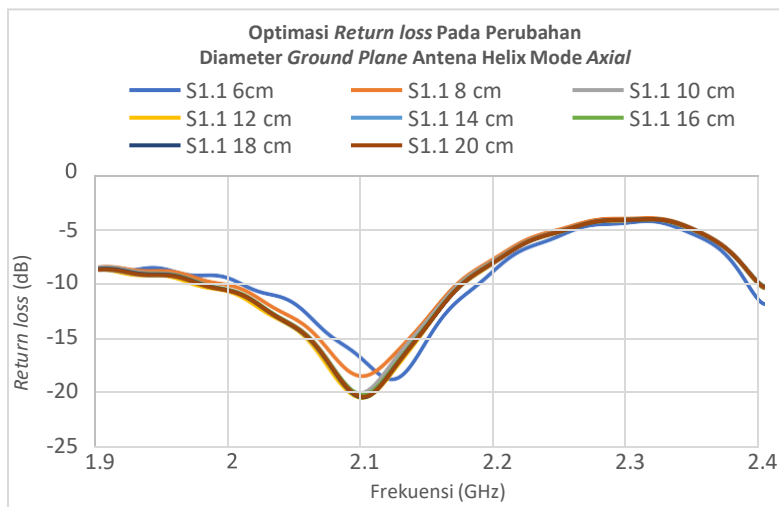
3.4. Hasil Dan Analisa Antena Helix Mode Axial Dengan Merubah Diameter Ground Plane

Tabel 4. Hasil Perubahan Diameter Ground Plane Antena Helix Mode Axial

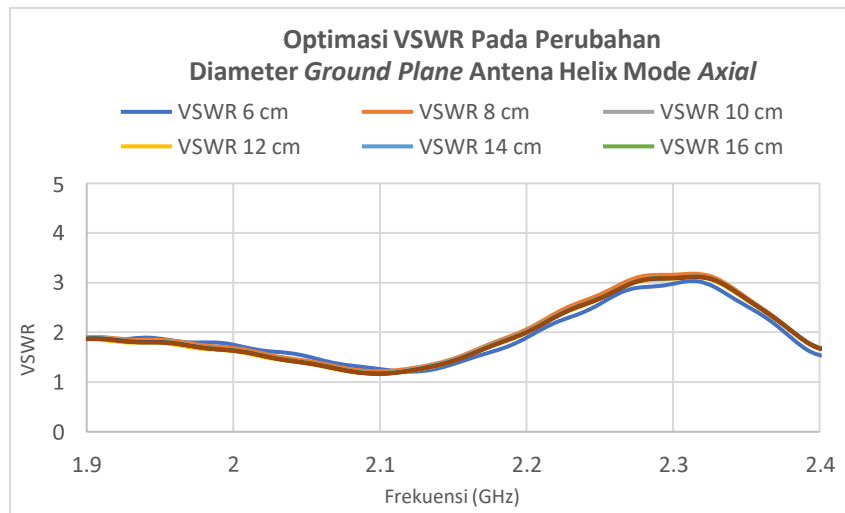
No	Diameter Ground plane (cm)	Frekuensi (GHz)	Return Loss	VSWR
1	6	2,1	-18,72	1,2620
2	8	2,1	-20,06	1,2202
3	10	2,1	-21,55	1,1825
4	12	2,1	-22,05	1,1713
5	14	2,1	-21,81	1,1766
6	16	2,1	-21,75	1,1778
7	18	2,1	-22,01	1,1723
8	20	2,1	-21,96	1,1733

Meninjau dari data perubahan diameter lilitan yang bekerja pada frekuensi 2,1 GHz, dengan menggunakan perbedaan jarak antar ukuran 0,2 cm dan dari hasil yang telah didapat, melalui Tabel 4 tersebut terlihat bahwa semua nilai parameter *return loss* yang dihasilkan memenuhi standar parameter, yaitu kurang dari -10 dB, sama halnya dengan *return loss*, pada parameter VSWR terlihat bahwa semua dari tahapan optimasi ini memenuhi dengan standar parameter yang bernilai kurang dari 2, dari 8 percobaan optimasi yang telah dilakukan hanya terdapat satu yang hasilnya memenuhi standar parameter yang dibutuhkan, yaitu pada diameter *ground plane* yang berukuran 12 cm.

Dapat diamati pada Gambar 8 grafik perubahan diameter *ground plane* pada antena helix mode axial terhadap parameter *return loss*, diketahui pada pengaruh optimasi perubahan diameter *ground plane* mengalami hasil dengan nilai yang tidak stabil dan hanya pada ukuran diameter terkecil saja yang perubahannya terlihat signifikan, salah satunya pada ukuran diameter 6 cm di mana pada nilai tersebut terjadi pergeseran frekuensi. Pada tahapan ini dibatasi dengan hanya mengamati frekuensi pada 2,1 GHz. Di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah diameter *ground plane* helix mode axial parameter *return loss* yang didapat berukuran -22,05 dB.



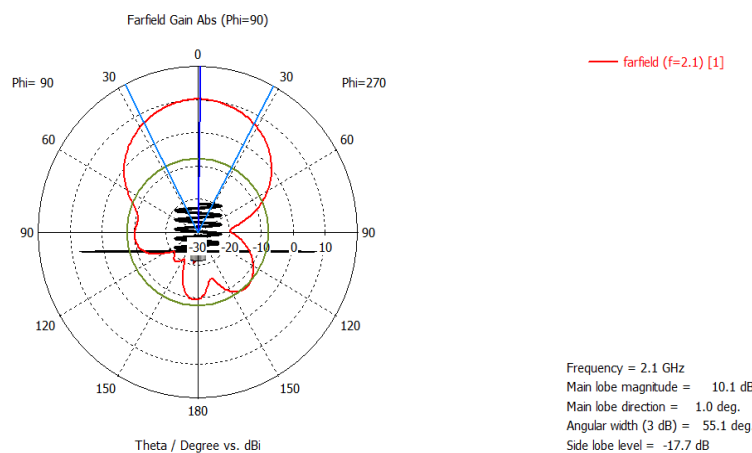
Gambar 8. Perubahan Return Loss Diameter Ground Plane Antena Helix Mode Axial.



Gambar 9. Perubahan VSWR Diameter *Ground Plane* Antena Helix Mode Axial.

Dapat diamati pada Gambar 9 grafik perubahan diameter *ground plane* antena helix mode axial terhadap parameter *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), melalui grafik tersebut, hasil dari simulasi yang diamati merupakan pengaruh terhadap frekuensi 2,1 GHz. Dalam hasil VSWR terhadap frekuensi kerja 2,1 GHz perubahan nilai yang didapat menjadi besar, tetapi perbedaan angkanya tidak terlalu jauh, di mana pada hasil optimasi yang terbaik dalam mengubah diameter *ground plane* helix mode axial parameter yang didapat berukuran 12 cm.

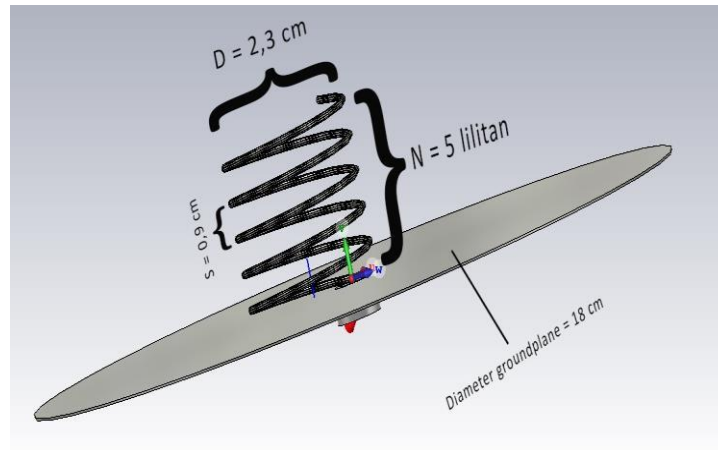
### 3.5. Hasil Dan Analisa Pola Radiasi Pada Antena Helix Mode Axial



Gambar 10. Pola Radiasi Rancangan Akhir Antena Helix Mode Axial.

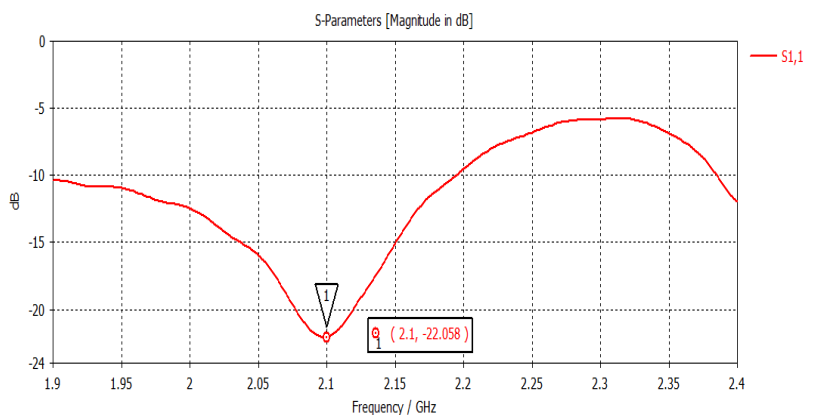
Berdasarkan hasil optimasi didapatkan bentuk pola radiasi rancangan akhir dari antena helix yang disimulasikan. Pola radiasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 10, di mana pola pancarannya tetap satu arah, tetapi pada nilai *main lobe magnitude* (besarnya pola radiasi maksimum) meningkat menjadi 10,1 dB, terdapat beberapa hasil parameter, *main lobe direction* (arah pola radiasi) bernilai 1,0 *degree*, *angular width* (lebar sudut) bernilai 55,1 *degree*, *side lobe* bernilai -17,7 dB (minus ini dinyatakan daya yang terbuang).

3.6. Hasil Akhir Optimasi Antena Helix Mode Axial

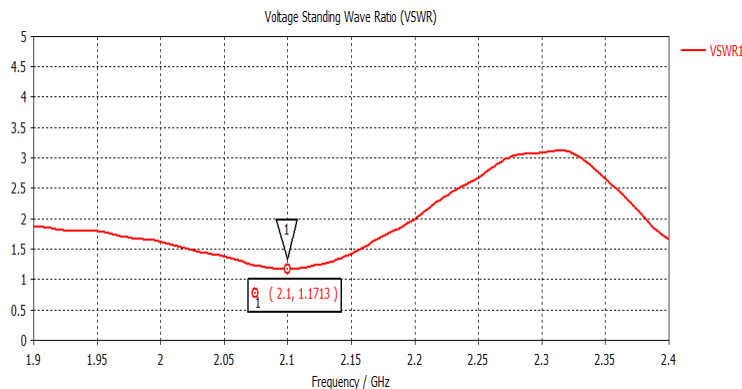


Gambar 11. Desain Akhir Antena Helix Mode Axial Setelah Optimasi.

Pada hasil akhir optimasi antena helix mode axial ini dapat dilihat pada Gambar 11, di mana rancangan antena tersebut didesain dengan menggunakan *software CST Studio Suite 2020*. Dapat dilihat bahwa desain akhir setelah optimasi dari antena helix secara keseluruhan berbeda dengan desain antena helix awal yang belum dioptimasi, terlihat jelas bagian yang membedakannya, yaitu dari jarak antar lilitan ( $S = 0,9$  cm), jumlah lilitan ( $N = 5$  Lilitan), diameter antena ( $D = 2,3$  cm), dan diameter *ground plane* (18 cm).



Gambar 12. S-Parameter Antena Helix Mode Axial Setelah Optimasi.

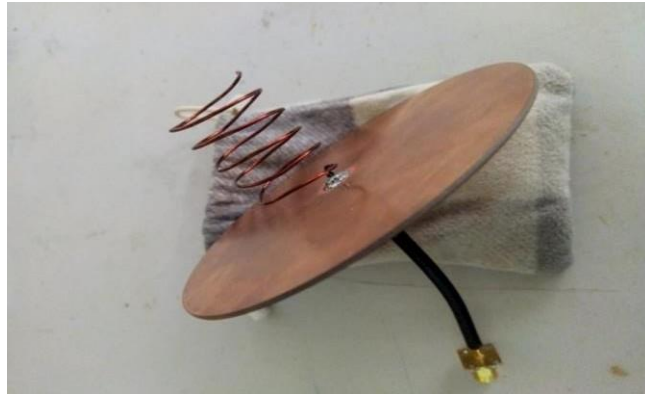


Gambar 13. VSWR Antena Helix Mode Axial Setelah Optimasi

Dapat diamati pada Gambar 12 bentuk *return loss* dan Gambar 13 bentuk VSWR dari desain akhir antena helix mode axial yang telah dioptimasi, terlihat dari hasil tersebut sangat berbeda hasilnya. Nilai yang didapat pada parameter *return loss* sebesar -22,05 dB dan nilai VSWR yang didapat sebesar 1,2. Setelah mendapatkan hasil yang lebih baik dari tahapan optimasi maka dari itu, tahapan selanjutnya untuk antena helix mode axial ini akan

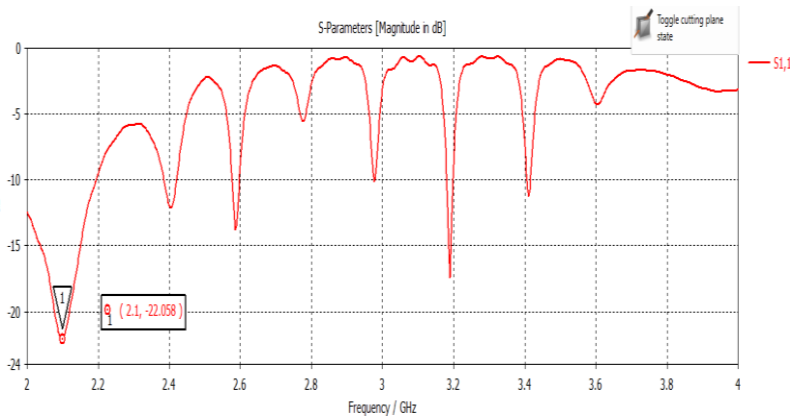
difabrikasikan atau direalisasikan, untuk mengetahui perbandingan hasil yang disimulasikan dengan hasil pengukuran.

**3.7. Realisasi dan Analisa Hasil Pengukuran Antena Helix Mode Axial**

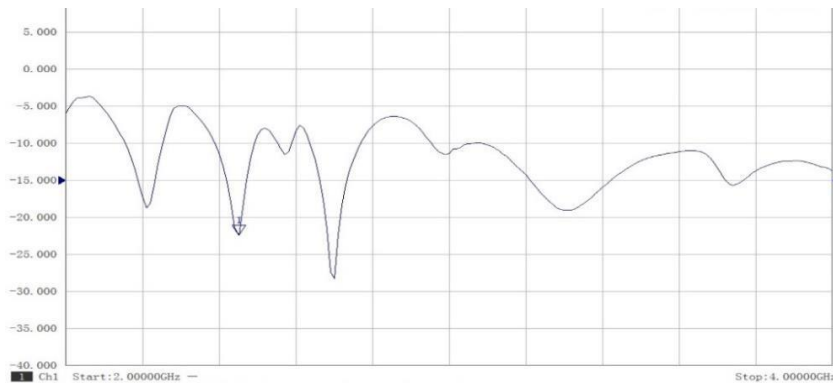


Gambar 14. Fabrikasi Antena Helix Mode Axial

Setelah melakukan simulasi didapat antena helix mode axial yang telah difabrikasi seperti pada Gambar 14, di mana pada antena helix ini menggunakan *ground plane* yang berbentuk lingkaran dan berbahan dasar FR-4 Epoxy dengan ukuran berdiameter 18 cm, dengan ukuran jarak antar lilitan 0,9 cm, diameter lilitan antena helix 2,3 cm, jumlah lilitan dengan menggunakan 5 lilitan, dan antena helix ini menggunakan kabel *coaxial* RG-58 dan port SMA male 50 Ohm sebagai penghubung terhadap alat ukur. Untuk dapat mengetahui perbandingan antena hasil simulasi dan antena yang sudah difabrikasi, dilakukan pengukuran di laboratorium elektro Universitas Jenderal Achmad Yani dengan menggunakan alat ukur VNA (*Vector Network Analyzer*).



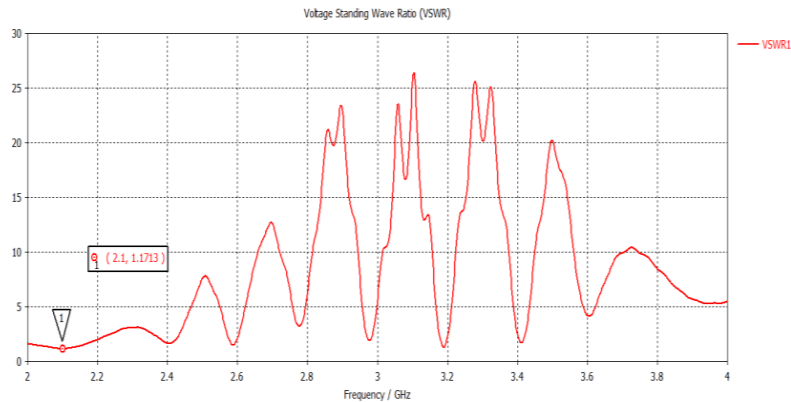
Gambar 15. Hasil Simulasi S1,1 Antena Helix Mode Axial.



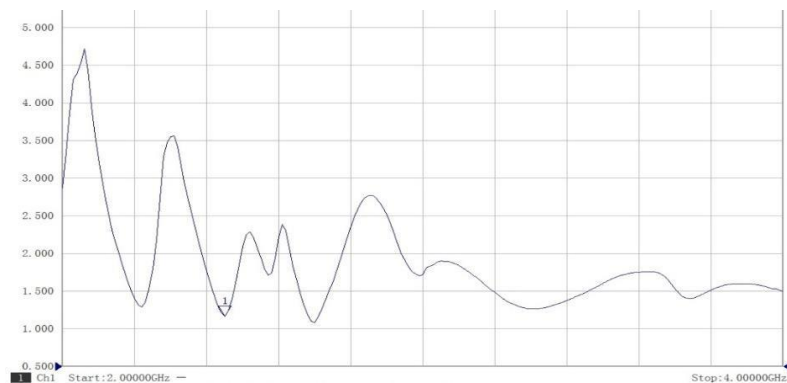
Gambar 16. Hasil Pengukuran S1,1 Antena Helix Mode Axial.

Hasil simulasi Gambar 15 dan hasil pengukuran Gambar 16 untuk S1,1 parameter (*return loss*), diamati bahwa hasil simulasi dan pengukuran terdapat pergeseran frekuensi sebesar 100 MHz yang semula 2,1 GHz menjadi 2,2

GHz. Pada hasil S1,1 parameternya mendapatkan hasil yang tidak berbeda jauh dengan nilai sebesar -19 dB untuk hasil pengukuran dan -22 dB untuk hasil simulasi, pada hasil pengukuran dapat diamati bahwa hasil S1,1 parameter menghasilkan beberapa dengan nilai yang terbaik selain pada frekuensi 2,2 GHz saja, seperti yang ada pada frekuensi tengah 2,4 GHz dan pada frekuensi 2,7 GHz. Terlihat pada hasil pengukuran dan simulasi terdapat perbedaan. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor yang terjadi pada saat pengukuran antena helix tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran antena helix, yaitu ruangan yang tidak memiliki kedap pantulan gelombang dan terdapat sifat ukuran bahan berubah.



Gambar 17. Hasil Simulasi VSWR Antena Helix Mode Axial.



Gambar 18. Hasil Pengukuran VSWR Antena Helix Mode Axial.

Hasil simulasi Gambar 17 dan hasil pengukuran Gambar 18 untuk *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)*, diamati bahwa hasil simulasi dan pengukuran terdapat pergeseran frekuensi sebesar 100 MHz yang semula 2,1 GHz menjadi 2,2 GHz. Pada hasil VSWR parameternya mendapatkan hasil yang tidak berbeda jauh juga, dengan nilai sebesar -1,40 untuk hasil pengukuran dan -1,17 untuk hasil simulasi, pada hasil pengukuran ini dapat diamati bahwa hasil VSWR parameter dengan nilai yang terbaik selain pada frekuensi 2,2 GHz saja, seperti yang ada pada frekuensi tengah 2,4 GHz dan pada frekuensi 2,7 GHz. Terlihat pada hasil pengukuran dan simulasi terdapat perbedaan. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor yang terjadi pada saat pengukuran antena helix tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran antena helix, yaitu ruangan yang tidak memiliki kedap pantulan gelombang dan terdapat sifat ukuran bahan berubah.

### Kesimpulan

Hasil optimasi pada perancangan antena helix mode axial pada perubahan jarak antar lilitan semakin besar nilai jarak yang diubah maka nilai *return loss* dan VSWR yang didapat tidak stabil atau naik dan turun hasil ukuran terbaik pada jarak antar lilitan bernilai 0,9 cm, diameter antena helix bernilai 2,3 cm, diameter *ground plane* bernilai 18 cm, dengan menggunakan 5 lilitan dan pada hasil *return loss* yang didapat bernilai -22 dB dan VSWR bernilai 1,17. Pada hasil pengukuran dan simulasi terjadi pergeseran frekuensi menjadi 2,42 GHz hal ini dikarenakan pita frekuensi *s-band* bekerja pada frekuensi 2 GHz sampai dengan 4 GHz. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran, yaitu ruangan yang digunakan untuk pengukuran tidak memiliki kedap pantulan gelombang, dan terdapat sifat ukuran bahan berubah.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas Jurusan Teknik Elektro UNJANI atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada pada Laboratorium Teknik Elektro UNJANI yang membantu proses pengukuran dari realisasi antena helix yang telah difabrikasi.

## Daftar Notasi

- $\lambda$  = Panjang gelombang [m]  
 $A$  = Panjang total dari antena helix [mm]  
 $C$  = Keliling antena helix [mm]  
 $D$  = Diameter antena helix [mm]  
 $S$  = Jarak antar lilitan antena helix [mm]  
 $N$  = Jumlah lilitan antena helix

## Daftar Pustaka

- Ahmadi, H., Ramadhan, S., Fathurahman, M., Ardinal, R., Studi, P., & Multimedia, B. (2017). Analisis Perbandingan Pengaruh Lilitan Dan Bahan Antena Helical S-Band Sebagai Penerima Data Satelit. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 206–215.
- Aztris, A., & Wijanto, H. (2019). Antena Helix Mode Axial Untuk Sensor Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar ( Cp-Sar ) Pada Pesawat Tanpa Awak Axial Mode Helical Antenna for Sensor of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar ( Cp-Sar ) Onboard Unmanned Aerial Vehicle ( Uav ). *Jurnal of Engineering*, 6(1), 428–443.
- Balannis, C. (n.d.). *Antenna Theory : Analisis and Desain*.
- Dwijayatno, F. M., Christyono, Y., & Santoso., I. (2014). *Perancangan Antena Helix Untukmeningkatkan Daya Terima Sinyal Gsm 900 Yang Memiliki Level Daya Rendah*.
- Eska, A. C., & Setiabudi, D. (2015). *Radar S-Band Pendeteksian Misil Disepanjang Pulau Jawa Indonesia Bagian Selatan*. 41–44.
- Faizal, I. (2016). ( Development of 8 . 2 Ghz X-Band Helical Antenna for Micro Satellite ). *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 103–112.
- Fauzi, A., & Cahyadi, W. (2020). Desain Dan Implementasi Antena Helix Dan Rectangular Patch Dengan Inset Feed Untuk Passive Repeater Pada Frekuensi Wcdma. *Transmisi*, 22(2), 38–44. <https://doi.org/10.14710/transmisi.22.2.38-44>
- Lestari, A. A., Bharata, E., Yulian, D., & Winarko, D. (2012). *Indera Ms-1 : Radar S-Band Pertama Karya Anak Bangsa*. 80–84.
- Maharani. (2018). *Antena helix*.
- Martripagelardo, Dedy Suryadi, F Trias Pontia W, Fitri Imansyah, J. M. (2019). Identifikasi Penerimaan Sinyal Antena Digital Untuk Televisi. *Jetc*, 14(2).
- Muchtar, H., & Firmansyah, T. (2019). Perancangan Dan Simulasi Antena Helix Pada Frekuensi 2,4 Ghz. *Jurnal Elektum*, 15(2), 27–32.
- Muthiah, Amalina; Nugroho, Bambang Setia; Wahyu, Y. (2018). Antena Omnidirectional Ultra Wide Band (UWB) Untuk Aplikasi Electronic Support Measure (ESM). *Antena Omnidirectional Ultra Wide Band (Uwb) Untuk Aplikasi Electronic Support Measure (Esm)*.
- Rafsyam, Y., Jonifan, J., & Ibrahim N, P. I. N. (2018). Rancang Bangun Antena Helix 8 Lilitan untuk Sistem Autotracking sebagai Penjejak Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 6(2), 248. <https://doi.org/10.36055/setrum.v6i2.2771>
- Setiabudi, D., & Wicaksono, L. B. H. (2018). Rancang Bangun Antena Helix Mode Axial dan Patch Meanderline DGS untuk Aplikasi LPWAN Berbasis IoT pada Daerah Rural. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 14(2). <https://doi.org/10.17529/jre.v14i2.10906>
- Susanto, H. A. (2018). Desain dan Manufaktur Antena Heliks Oktafilar Pada Frekuensi 436,5 MHz Untuk Sistem Komunikasi Satelit. *E-Link : Jurnal Teknik Elektro Dan Informatika*, 6(2), 27.

## Pengaturan Parameter *Power System Stabilizer* pada Pembangkit di Sistem IEEE 39 Bus

Hasna Satya Dini<sup>1</sup> dan Rizki Pratama Putra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Fakultas Ketengalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Indonesia

[hasna@itpln.ac.id](mailto:hasna@itpln.ac.id), [rizki@itpln.ac.id](mailto:rizki@itpln.ac.id)

### Abstrak

Semakin kompleksnya sebuah sistem kelistrikan menyebabkan permasalahan yang muncul menjadi semakin kompleks. Salah satu isu yang penting untuk dilakukan kajian adalah terkait kestabilan sistem, khususnya kestabilan sinyal kecil. *Power System Stabilizer* merupakan komponen dari sistem eksitasi pembangkit yang dapat memberikan solusi dari permasalahan kestabilan sinyal kecil jika dilakukan pengaturan yang tepat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan observasi parameter *Power System Stabilizer* untuk meningkatkan kestabilan sinyal kecil pada sistem IEEE 39 Bus. *Power System Stabilizer* dapat meningkatkan batas kestabilan sistem dengan melakukan redaman pada osilasi untuk rentang frekuensi 0.2-2.5 Hz. Dalam penentuan pembangkit yang memerlukan pemasangan *Power System Stabilizer* dilakukan pemodelan generator menggunakan model *Heffron-Phillips* dimana dalam menentukan generator yang perlu dipasang PSS digunakan perhitungan faktor partisipasi. Penentuan parameter PSS menjadi krusial dimana, dengan menganalisa batas-batas kestabilan dan proses iterasi nilai faktor penguatan, konstanta waktu, dan washout filter dapat ditentukan. Berdasarkan analisis modal didapatkan bahwa G10 memiliki partisipasi tinggi dalam moda yang tidak stabil sehingga diputuskan perlu dilakukan pemasangan PSS pada generator tersebut. Setelah dilakukan pemasangan PSS didapatkan faktor redaman yang dihasilkan oleh pemasangan PSS masih kurang dari 5%. Melalui penggunaan metoda *Heffron-Phillips* diperlukan adanya langkah tambahan optimasi tambahan sehingga penentuan parameter PSS dapat memberikan hasil yang lebih baik.

Kata kunci: kestabilan sinyal kecil, *power system stabilizer*, metoda *bode plot*, IEEE 39 bus

### Abstract

The more complex an electrical system is causing, the more complex problems will be anticipated. One of the problem that shall be studied extensively is system stability, especially small-signal stability. A power system stabilizer is a component of the excitation generation system that can solve small-signal stability problems if the proper settings are made. This study aims to observe the parameters of the Power System Stabilizer to improve small signal stability on the IEEE 39 Bus system. The Power System Stabilizer can increase the system stability limit by attenuating the oscillations for the frequency range of 0.2-2.5 Hz. The Heffron-Phillips model is employed to model the generator in Matlab. Participatory factor calculations are used to determine the generator that needs to be installed by PSS. PSS parameter control can be determined by analyzing the stability limits and the iteration process. Based on the modal analysis, it was found that G10 had a high partition in an unstable mode, so it was decided that installing PSS on the generator was necessary. After installing PSS, the damping factor produced by installing PSS was still less than 5%. Using Heffron-Phillips method requires additional adjustment steps to handle PSS parameters and provide better results.

Keywords: small signal stability, power system stabilizer, bode plot method, IEEE 39 bus

### 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik pada saat ini merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Energi listrik telah menjadi roda penggerak utama dalam sektor bisnis, industri, maupun rumah tangga. Meningkatnya kebutuhan listrik baik itu alam dunia bisnis maupun rumah tangga menyebabkan operasi generator yang mendekati batas kestabilannya. Operasi generator yang mendekati batas kestabilan dapat menyebabkan sistem kelistrikan menjadi rawan untuk terkena osilasi elektromekanik (P. Arunagirinathan, 2018). Beberapa contoh terjadinya gangguan elektromekanik adalah *blackout* yang terjadi pada tahun 2016 adalah sub-sistem Bengkulu yang terlepas dari sistem Sumatera bagian selatan yang menyebabkan hilangnya pasokan listrik di area tersebut (Dini, 2017). Gangguan IBT yang seharusnya mampu ditanggulangi oleh *defense scheme* ternyata menyebabkan *blackout* pada subsistem Bengkulu akibat adanya gangguan sinyal kecil.

Pengaturan sistem eksitasi yang tepat mampu untuk memberikan redaman sinyal kecil ketika terjadi gangguan pada sistem (Chandan Kumar, 2020). Penggunaan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) untuk melakukan pengaturan tegangan secara *automatic* dan cepat mampu meningkatkan kestabilan tunak dari sistem transmisi. Namun, AVR memiliki efek yang buruk pada kestabilan transien karena meningkatkan keterlambatan fasa pada sistem (Kharrazi, 2015). Osilasi pada

#### Info Makalah:

Dikirim : 05-31-23;

Revisi 1 : 06-19-23;

Diterima : 06-19-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [hasna@itpln.ac.id](mailto:hasna@itpln.ac.id)



frekuensi rendah sekitar 0,2–2,5 Hz dapat terjadi pada sistem akibat gangguan besar seperti hubung singkat fasa-tanah.

Untuk menghindari permasalahan kestabilan tersebut digunakan *Power System Stabilizer* yang merupakan komponen dari sistem eksitasi pembangkit. PSS mampu memberikan sinyal tambahan dalam menjaga stabilitas sebuah sistem tenaga (Zea, 2013b). PSS memberikan redaman pada sistem melalui modulasi sistem eksitasi dengan menambahkan komponen torka elektrik yang satu fasa dengan perubahan kecepatan. PSS mampu melakukan redaman osilasi untuk frekuensi 0,1 sampai 2,5 Hz (Others, 1994). Pengaturan parameter *Power System Stabilizer* harus dilakukan secara tepat agar mampu mengompensasi keterlambatan fasa akibat *exciter*, generator, dan sistem tenaga.

Terdapat beberapa metoda yang dapat digunakan pada pengaturan parameter *Power System Stabilizer* antara lain metoda linearisasi, *eigenvalue sensitivity analysis*, *bode plot*, Lyapunov maupun optimasi seperti *genetic algorithm* (Zea, 2013b). Pemilihan metoda yang digunakan dapat didasarkan pada besar kecilnya sistem tenaga listrik yang menjadi objek penelitian. Di mana pembangunan optimisasi dapat dilakukan ketika sistem dihadapi adalah sistem yang besar dan kompleks. Pada penelitian di mana digunakan sistem IEEE 39 bus (G. Tricarico, 2023), akan digunakan metoda *bode plot* dalam melakukan penentuan parameter dari PSS untuk meningkatkan stabilitas sinyal kecil.

### 1.1. Sistem IEEE 39 Bus

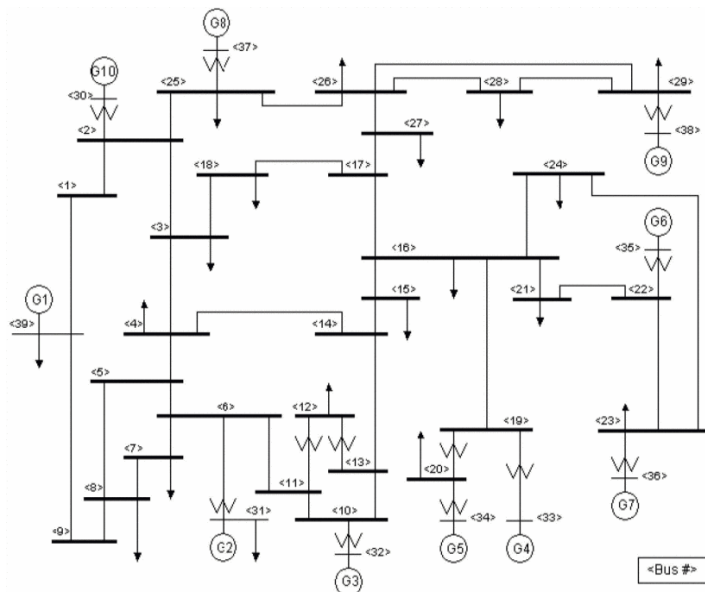
Sistem IEEE 39 Bus merupakan sistem contoh yang disediakan oleh IEEE yang dapat digunakan untuk melakukan percobaan. Sistem ini terdiri dari 10 generator, 19 beban, dan 39 Bus. Total pembebanan pada sistem ini adalah 320 MW. Terdapat 3 level tegangan yaitu 345 kV, 230 kV, dan 16,5 kV.

Tabel 1. Data Pembebanan Sistem IEEE 39 Bus.

Beban	Daya Aktif (MW)	Daya reaktif (MVAR)	Beban	Daya Aktif (MW)	Daya reaktif (MVAR)
Load 03	322	2,4	Load 23	247,5	84,6
Load 04	500	184	Load 24	308,6	-92,2
Load 07	233,8	84	Load 25	224	47,2
Load 08	522	176	Load 26	139	17
Load 12	7,5	88	Load 27	281	75,5
Load 15	320	153	Load 28	206	27,6
Load 16	329	32,3	Load 29	283,5	26,9
Load 18	158	30	Load 31	9,2	4,6
Load 20	628	103	Load 39	1104	250
Load 21	274	115			

Tabel 2. Data Pembangkitan Sistem IEEE 39 Bus.

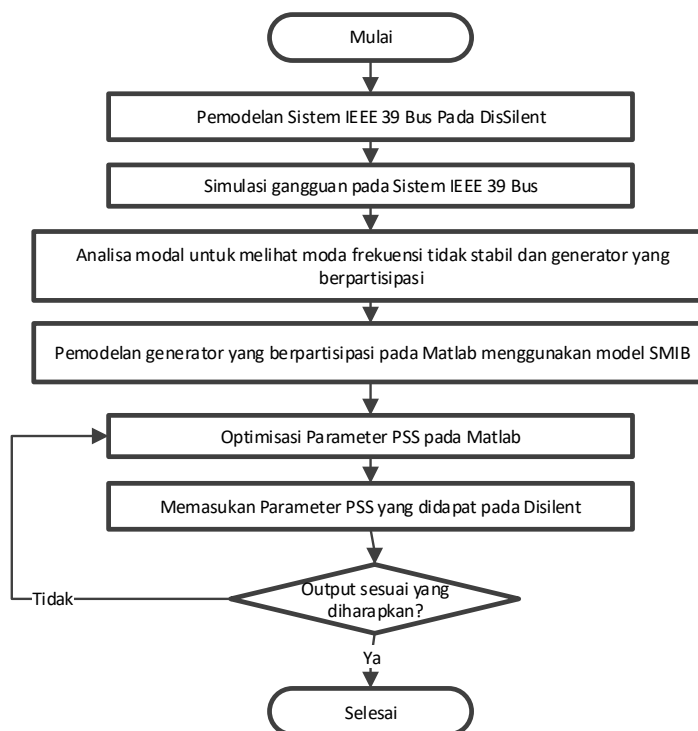
Pembangkit	Daya Aktif (MW)
G 01	1000
G 02	<i>Slack bus</i>
G 03	650
G 04	632
G 05	254
G 06	650
G 07	560
G 08	540
G 09	830
G 10	250



Gambar 1. Sistem Kelistrikan IEEE 39 Bus (M. Cupelli, 2012).

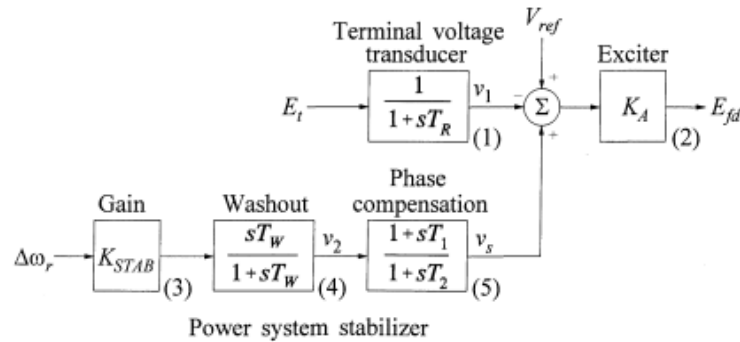
## 2. Metode

Dalam pengerjaan penelitian ini dilakukan pada kondisi normal. Adapun algoritma yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai Gambar 2. Langkah pertama dalam percobaan ini adalah dengan melakukan pemodelan sistem IEEE 39 bus untuk dilakukan simulasi gangguan. Tujuan dari Simulasi gangguan ini untuk mendapatkan respon osilasi sistem untuk nantinya dilakukan identifikasi moda tidak stabil dan generator mana yang memberikan partisipasi paling tinggi dalam moda frekuensi yang menyebabkan ketidakstabilan sinyal kecil. Faktor partisipasi sendiri merupakan indikasi seberapa berpengaruhnya generator pada suatu moda frekuensi. Faktor partisipasi ini digunakan untuk menentukan generator yang krusial untuk dilakukan penempatan atau penyetelan ulang parameter PSS. Apabila terdapat generator dengan faktor partisipasi nol pada sebuah moda, generator tersebut tidak memberikan implikasi apapun pada moda tersebut. Sedangkan jika faktor partisipasinya bernilai real positif, penambahan redaman pada generator akan meningkatkan rasio redaman pada moda tersebut. Namun apabila faktor partisipasinya bernilai real negatif, penambahan redaman pada generator akan mengurangi redaman dari generator.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Setelah dilakukan identifikasi generator yang berpengaruh dilakukan pemodelan generator pada Matlab menggunakan model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Sistem SMIB yang dilengkapi dengan blok diagram sistem eksitasi dalam hal ini adalah AVR dan PSS berfungsi untuk melakukan *tuning* parameter PSS. Blok diagram dari PSS dapat diilustrasikan dengan Gambar 3. Terdapat tiga komponen utama dari PSS yaitu, blok kompensator fasa, blok *washout* sinyal, dan blok gain. Blok kompensator fasa berfungsi untuk mengkompensasi fasa *lag* antara input *exciter* dan torka elektrik generator. Blok *washout* sinyal berfungsi sebagai *filter high pass* dengan konstanta waktu  $T_w$ . Blok ini berfungsi untuk mencegah sinyal pada keadaan tunak untuk diproses oleh PSS sehingga dapat mengubah tegangan terminal. Pemilihan nilai  $T_w$  harus memperhatikan lebar frekuensi dari sinyal input yang diinginkan untuk diproses namun tidak menyebabkan terjadinya ekskursi pada tegangan generator pada saat keadaan *island*. Blok gain menentukan besaran redaman yang diberikan oleh PSS. Umumnya konstanta gain ( $K_{stab}$ ) diatur setinggi mungkin.



Gambar 3. Blok Diagram yang Merepresentasikan AVR dan PSS (Others, 1994).

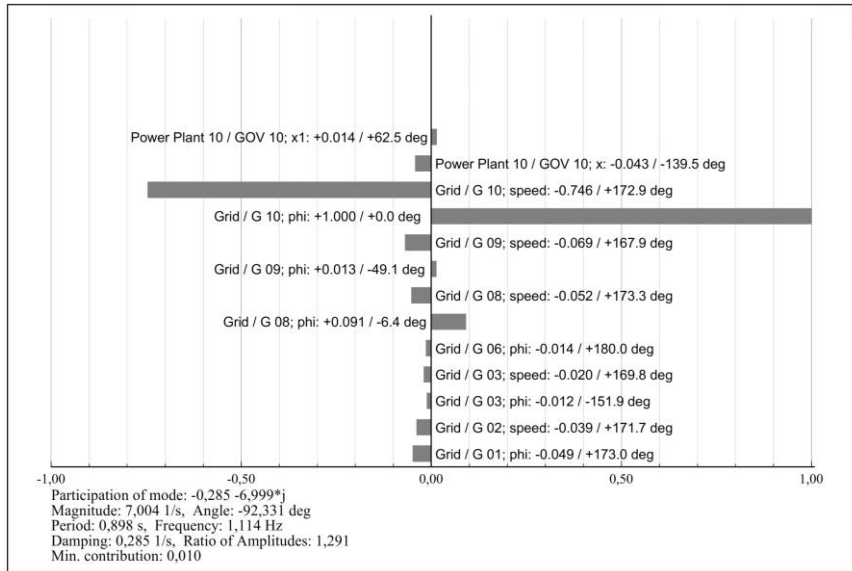
## 2.1. Identifikasi Moda Redaman dan Faktor Partisipasi

Identifikasi moda frekuensi yang tidak stabil dilakukan dengan menggunakan analisis modal. Moda frekuensi yang tidak stabil adalah moda dengan rasio redaman kurang dari 5% (Padiyar, 1996). menunjukkan bahwa moda osilasi inter-area dan moda osilasi lokal. Di mana frekuensi teredam untuk moda osilasi inter-area adalah 0,5 Hz, sedangkan pada moda osilasi lokal 0,7 – 2 Hz. Moda 00043 dan Moda 00044 memiliki rasio redaman 0,041, sehingga dapat digolongkan pada moda tidak stabil. Kedua moda ini memiliki frekuensi teredam 1,114 dimana berada pada rentang frekuensi untuk osilasi mode lokal.

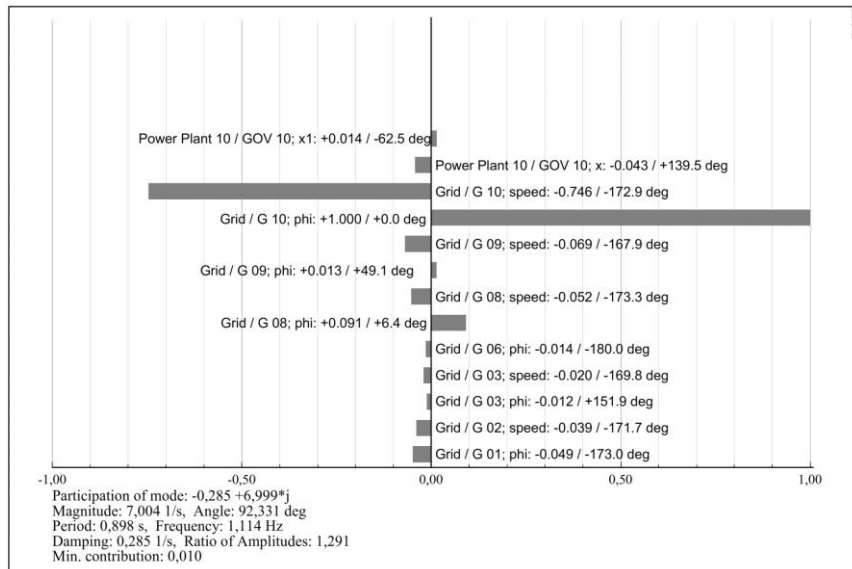
Pada moda yang tidak stabil dilakukan analisa faktor partisipasi untuk melihat generator apa yang memiliki peran yang tinggi dalam ketidakstabilan sistem. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan plot garis dari faktor partisipasi untuk masing-masing moda. Generator G10 memiliki faktor partisipasi yang paling tinggi sehingga diputuskan *power system stabilizer* perlu dipasang di generator tersebut.

Tabel 3. Analisa Nilai Eigen pada Sistem IEEE 39 Bus.

Mode	Nilai Eigen Real	Nilai Eigen Imajiner	Frekuensi Teredam	Rasio Redaman
Moda 00043	-0,285	6,999	1,114	0,041
Moda 00044	-0,285	-6,999	1,114	0,041
Moda 00045	-0,385	6,615	1,053	0,058
Moda 00046	-0,385	-6,615	1,053	0,058
Moda 00039	-0,464	7,518	1,196	0,062
Moda 00040	-0,464	-7,518	1,196	0,062
Moda 00047	-0,420	6,152	0,979	0,068
Moda 00048	-0,420	-6,152	0,979	0,068
Moda 00041	-0,576	7,477	1,190	0,077
Moda 00042	-0,576	-7,477	1,190	0,077
Moda 00035	-0,696	8,939	1,423	0,078
Moda 00036	-0,696	-8,939	1,423	0,078
Moda 00068	-0,314	4,012	0,639	0,078
Moda 00069	-0,314	-4,012	0,639	0,078
Moda 00037	-0,739	8,867	1,411	0,083
Moda 00038	-0,739	-8,867	1,411	0,083
Moda 00033	-0,820	9,111	1,450	0,090
Moda 00034	-0,820	-9,111	1,450	0,090
Moda 00028	-16,337	3,547	0,565	0,977
Moda 00029	-16,337	-3,547	0,565	0,977



Gambar 4. Faktor Partisipasi Moda Frekuensi 00043.



Gambar 5. Faktor Partisipasi Moda Frekuensi 00044.

2.2. Pemodelan Generator G10 pada Matlab

Pemodelan generator dilakukan untuk dapat melihat keterlambatan respon sistem generator, *exciter*, dan sistem tenaga. Model yang digunakan dalam pemodelan ini adalah model Heffron–Phillips. Pada pemodelan ini perlu diketahui data–data awal mesin dan jaringan antara lain impedansi saluran ke *infinite* bus (R dan X), aditansi beban loka (G dan B), reaktansi tunak generator ( $X_d$  dan  $X_q$ ) dan rating generator (Rifkiya, 2008).

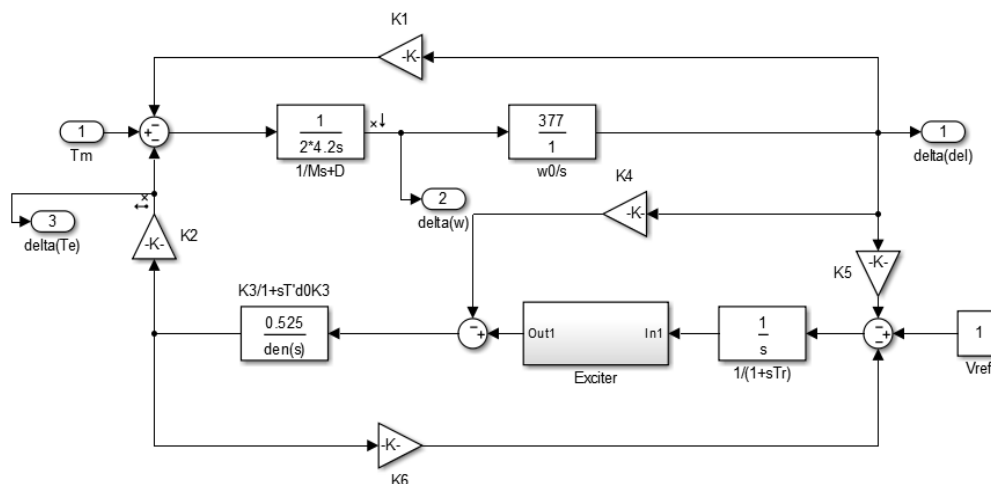
Berdasarkan perhitungan didapatkan konstanta Heffron–Phillips untuk generator G10 pada

Tabel 4. Nilai konstanta–konstanta tersebut selanjutnya dimasukkan ke dalam blok diagram Heffron–Phillips yang dimodelkan pada *Simulink* seperti pada Gambar 6.

Tabel 4. Konstanta Heffron–Phillips

Konstanta	Nilai
K1	0.778
K2	0.754
K3	0.7525
K4	0.76486
K5	0.50561
K6	-0.08629
K5	-0.161
K6	0.629

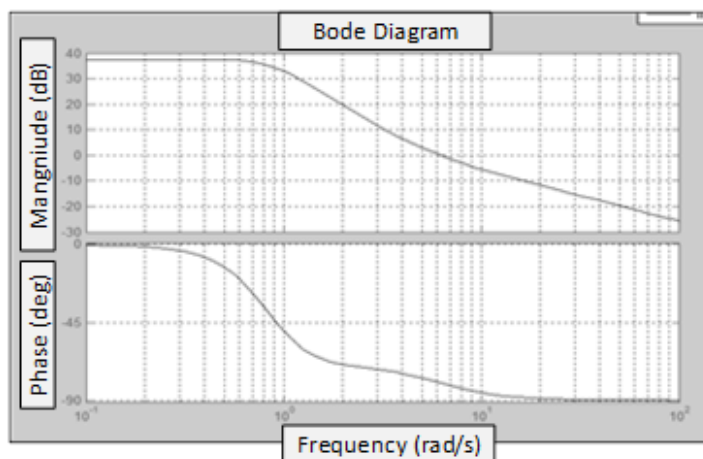
generator G10.



Gambar 6. Pemodelan Generator G10 dengan Pendekatan Heffron–Phillips.

### 2.3. Penentuan Konstanta Waktu untuk Kompensator PSS

Pada PSS yang digunakan, terdapat empat konstanta waktu ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) yang perlu diidentifikasi nilainya. Dasar dari penentuan konstanta waktu ini adalah identifikasi keterlambatan fasa pada dari GEP. Bode diagram dari GEP ditinjau dengan melihat  $\Delta\omega$  sebagai input dan  $\Delta T$  sebagai output.



Gambar 7. Respon Frekuensi pada Generator G10.

Penentuan konstanta waktu kompensator harus memenuhi aturan berikut (Padiyar, 1996)

- Fasa lag terkompensasi  $P(s) = GEP(s)PSS(s)$  harus melebihi  $90^\circ$  pada frekuensi sekitar 3.5 Hz
- Fasa lag terkompensasi pada moda lokal harus berada di bawah  $45^\circ$ , lebih baik apabila dapat di bawah  $20^\circ$
- Penguatan kompensator pada frekuensi tinggi harus diminimalkan

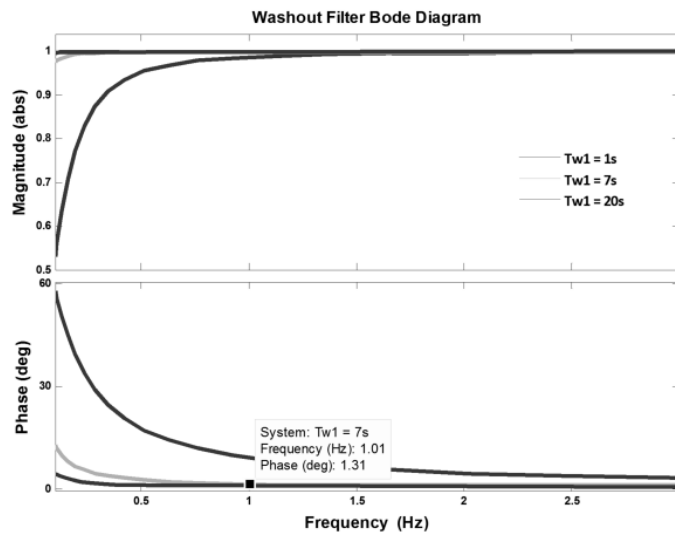
Berdasarkan syarat-syarat tersebut didapatkan konstanta waktu  $T_1, T_2, T_3, T_4$  sebagai berikut

Tabel 5. Konstanta Waktu pada Kompensator Fasa PSS.

$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
0.3	0.1	0.3	0.4

### 2.4. Penentuan Konstanta Waktu untuk Filter Washout PSS

Konstanta Washout berperan sebagai penyaring frekuensi rendah. Di mana Penentuan konstanta Washout akan bergantung dari frekuensi yang ingin diredam. Semakin rendah frekuensi yang akan diredam, nilai konstanta waktu harus semakin tinggi. Namun nilai konstanta redaman yang tinggi dapat menyebabkan bekerjanya PSS pada waktu yang tidak diharapkan. Gambar 8 menunjukkan diagram bode filter washout. Ketika  $T_w = 7s$ , nilai kontribusi fasa bernilai  $1^\circ$  untuk semua frekuensi.



Gambar 8. Bode Diagram Filter *Washout* (Zea, 2013a).

### 2.5. Penentuan Penguatan PSS

Penguatan PSS yang digunakan umumnya merupakan 1/3 dari penguatan maksimalnya (Dini, 2017). Untuk mengetahui nilai penguatan PSS dilakukan analisis *root locus* dari diagram GEP yang telah dilengkapi PSS. Penguatan yang diberikan pada PSS adalah 1/3 dari penguatan maksimal sebelum terjadinya ketidakstabilan. Pada kasus ini, nilai gain yang diberikan adalah 1.

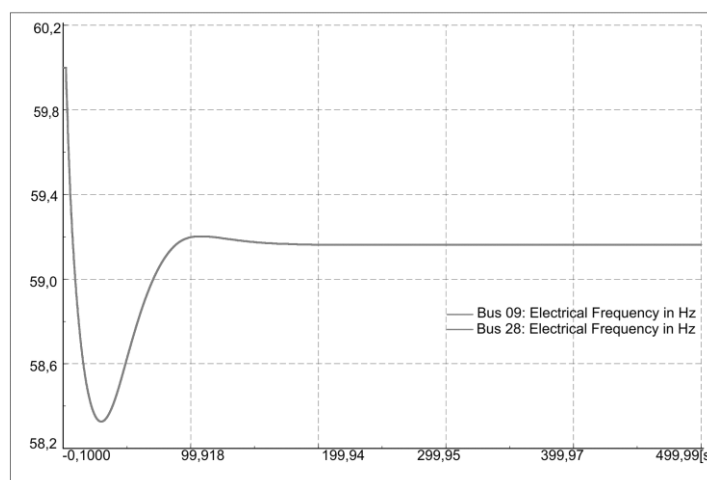
### 3. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan pemasangan PSS pada Generator G10 dilakukan kembali analisis modal pada IEEE 39 Bus dan uji coba pelepasan generator pada sistem. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah sistem masih dapat menjaga kestabilannya ketika terjadi gangguan. Tabel 6 menunjukkan bahwa setelah dilakukan pemasangan PSS, moda 43 dan moda 44 masih memiliki rasio redaman kurang dari 5%.

Tabel 6. Analisis Modal Setelah Terjadi Gangguan.

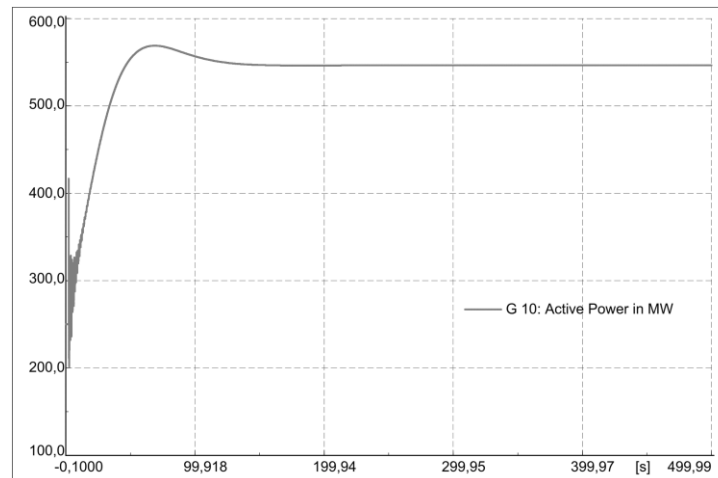
Mode	Nilai Eigen Real	Nilai Eigen Imajiner	Frekuensi Teredam	Rasio Redaman
Moda 00043	-0,285	6,999	1,114	0,041
Moda 00044	-0,285	-6,999	1,114	0,041

Ketika terjadi gangguan lepas generator G8, setelah penambahan PSS sistem masih dapat kembali ke kestabilannya seperti pada Gambar 9. Hal ini ditandai dengan frekuensi sistem yang dapat kembali ke nilai 59,2 Hz di mana nilai ini masih berada di batas ambang aman frekuensi.



Gambar 9. Frekuensi Sistem Setelah Lepasnya Generator G8.

Sedangkan daya keluaran pada generator G10, meningkat untuk membantu memenuhi kekurangan daya akibat lepasnya generator. Kenaikan daya yang terjadi tidak membuat generator hilang kestabilannya.



Gambar 10. Daya Aktif Keluaran G10 Setelah Lepasnya Generator G8.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan simulasi yang dilakukan Generator G10 merupakan generator yang berpartisipasi dalam moda yang tidak stabil. Perlu dilakukan pemasangan PSS pada generator ini untuk meredam moda yang tidak stabil. Di mana pemasangan PSS mampu membantu mengembalikan sistem ke ambang frekuensi stabil yaitu sekitar 59.2 Hz, namun faktor redaman pada moda yang berosilasi masih di bawah 5%. Sehingga diperlukan adanya studi lanjutan yang mencakup optimasi dalam penentuan parameter PSS karena dalam sistem IEE 39 bus penggunaan metoda *bode plot* tidak cukup untuk menyelesaikan solusi ketidakstabilan sinyal kecil.

## Daftar Pustaka

- Chandan Kumar, S. G., Saurav Sahay, Alok Pratap Singh, Akash Modi, Surajit Banerjee. (2020). *Experience of PSS Tuning in Indian Power System*. Paper presented at the National Power Systems Conference (NPSC), Gandhinagar, India.
- Dini, H. S. (2017). *Analisis Blackout Pasca Gangguan yang Terjadi Pada Subsistem Bengkulu*. Retrieved from Bandung:
- G. Tricarico, R. W., M. Dicorato, G. Forte, F. Gonzalez-Longatt and J. L. Rueda. (2023). *A Modified Version of the IEEE 39-bus Test System for the Day-Ahead Market*. Paper presented at the 2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Kharrazi, A. (2015). *Tuning of Power System Stabilizer in Single Machine Infinite Bus (SMIB) using Genetic Algorithm and Power Factory Modal Analysis*.
- M. Cupelli, C. D. C. a. A. M. (2012). *Voltage stability indices comparison on the IEEE-39 bus system using RTDS*. Paper presented at the 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, New Zealand.
- Others, P. K. a. (1994). *Power System Stability and Control*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute.
- P. Arunagirinathan, Y. W., A. Arzani and G. K. Venayagamoorthy. (2018). *Wide-Area Situational Awareness based Power System Stabilizer Tuning with Utility Scale PV Integration*. Paper presented at the 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC), Charleston, SC, USA.
- Padiyar, K. R. (1996). *Power System Dynamic and Control*: B. S. Publication.
- Rifkiya, G. (2008). *Peningkatan Kestabilan Dinamik Sistem Sumatera dengan Power System Stabilizer*. Retrieved from Bandung:
- Zea, A. A. (2013b). *Power System Stabilizers for The Synchronous Generator Tuning and Performance Evaluation*. Retrieved from Guteborg, Sweden

## Analisis Variabel Perubahan Suhu Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Dielektrik Udara

Christiono<sup>1</sup>, Miftahul Fikri<sup>1</sup>, Iwa Garniwa MK<sup>1,2</sup>, dan Kartika Tresya Mauriraya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia  
[christiono@itpln.ac.id](mailto:christiono@itpln.ac.id), [miftahul@itpln.ac.id](mailto:miftahul@itpln.ac.id), [iwa.garniwa@itpln.ac.id](mailto:iwa.garniwa@itpln.ac.id), [kartika@itpln.ac.id](mailto:kartika@itpln.ac.id)

### Abstrak

Permasalahan pada daerah tropis dimana adanya pengaruh perubahan suhu terhadap sistem tegangan tinggi mengakibatkan isolasi di sekitar penyaluran listrik yang terdapat pada kubikel 20 kV dapat memicu terjadinya kegagalan isolasi (*Breakdown Voltages*), kegagalan isolasi merupakan suatu gangguan kelistrikan yang mengakibatkan pemadaman listrik di area layanan pada suatu penyulang. Untuk mengurangi terjadinya pemadaman listrik akibat kegagalan isolasi dengan suhu yang berubah-ubah tersebut, maka dilakukan pengujian secara langsung dengan memberikan variasi suhu berkisar 30°C–90°C. Pengujian dilakukan Untuk melihat fenomena secara jelas. Pengujian dilakukan setiap kenaikan suhu 5°C. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh grafik yang menjelaskan penurunan nilai breakdown pada 50°C yang mengakibatkan tegangan tembus isolasinya bernilai 27kV dan penurunan tegangan tembus hingga suhu 90°C yang mengakibatkan tegangan tembus isolasinya menurun hingga 22kV. Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin besar kenaikan suhu maka semakin cepat pula tegangan tembus yang diperoleh. Selanjutnya data dari hasil penelitian diuji menggunakan metode analisis regresi linear sehingga diperoleh MAPE sebesar 3,89% dan RMSE sebesar 1,33 dengan persentase rata-rata sebesar 0,37%.

Kata kunci: *breakdown voltage*, kegagalan isolasi, kubikel 20kV, pengujian suhu dan udara, regresi inear

### Abstract

The problem in the tropics is the effect of temperature changes on the high voltage system, resulting in isolation around the electricity distribution in the 20 kV cubicle, which can trigger the insulation failure (*breakdown voltages*) on a feeder. To reduce the occurrence of power outages due to insulation failure with changing temperatures, direct testing is carried out by providing temperature variations ranging from 30°C to 90°C. To correctly understand the phenomenon, testing should be carried out. The test is carried out every 5°C temperature increase. Based on the research results, a graph is obtained that explains the decrease in the breakdown value at 50°C, which causes the insulation breakdown voltage to be 27kV, and the decrease in the breakdown voltage at 90°C, which causes the insulation breakdown voltage to decrease to 22kV. Based on experiments, it can be concluded that the greater the temperature rise, The breakdown voltage appears more quickly. Thereafter, the data from the research results were tested using the linear regression analysis method, so that a MAPE obtained 3.89% and an RMSE obtained 1.33 were obtained with an average percentage obtained 0.37%.

Keywords: *breakdown voltage*, insulation failure, 20kV cubicle, temperature and air testing, linear regression

### 1. Pendahuluan

Dalam penyaluran energi listrik bertegangan tinggi dibutuhkan peralatan yang handal. Masalah yang sering terjadi dalam penyaluran energi listrik adalah kegagalan isolasi (Harinata et al., 2019) yang disebabkan oleh kondisi iklim, polusi dan terpaan medan listrik (Mustamin, 2011). Perubahan iklim merupakan fenomena global, dimana kondisi alam mengalami pergeseran musim atau terjadi anomali terhadap kondisi normalnya dalam rentang waktu yang panjang dimana perubahan iklim identik dengan meningkatnya suhu udara (Alfiandy et al., 2022) perubahan iklim ini berdampak pada jaringan kelistrikan dalam hal ini pengaruh perubahan suhu pada daerah tropis, dapat mempengaruhi keandalan isolasi udara pada sistem distribusi (Abugalia, 2019), Selain dari pengaruh suhu, besarnya arus yang mengalir pada penghantar dapat mengakibatkan peningkatan suhu di kubikel 20 kV kemudian berkurangnya keandalan pada sistem hingga terjadinya kerusakan pada peralatan (Akhir et al., 2021) pada peralatan tegangan tinggi isolasi biasanya di gunakan unntuk memisahkan antara 2 peralatan yang tidak memiliki tegangan dengan peralatan

#### Info Makalah:

Dikirim : 05-23-22;  
Revisi 1 : 12-03-22;  
Revisi 2 : 05-14-23;  
Revisi 3 : 06-23-23;  
Diterima : 06-23-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 853-9858-4508  
e-mail : [christiono@itpln.ac.id](mailto:christiono@itpln.ac.id)

listrik yang memiliki tegangan (Ge et al., 2020). supaya di dalam rangkaian tersebut tidak terjadi munculnya lompatan/percikan elektron (*Flashover/sparkover*) yang akan mengakibatkan kerusakan pada peralatan tegangan tinggi (Guerra-Garcia et al., 2020), dalam penyaluran tegangan tinggi semakin besar energi listrik yang digunakan maka semakin besar pula tegangan listrik yang disalurkan, dengan besarnya tegangan listrik tersebut mengakibatkan isolasi udara yang digunakan harus memiliki tahanan isolasi yang besar pula (Haddin & Bahtiar, 2018). Untuk menghindari adanya kegagalan isolasi dan fenomena korona yang bersifat merusak



peralatan sistem tenaga listrik dan tentunya sangat berdampak pada sistem kelistrikan 20 kV (Harinata et al., 2019). Penyebab dari adanya kerusakan peralatan tegangan tinggi bisanya terdapat beberapa hal yaitu adanya tegangan lebih yang mengakibatkan pemanasan pada penghantar. Panas tersebut dapat menyebabkan naiknya suhu pada isolasi yang melebihi batasnya. Apabila peristiwa ini terjadi terus menerus pada isolasi maka pada isolasi akan mengalami penurunan kualitas tahanan isolasinya dan dapat menyebabkan kegagalan isolasi, hal ini dapat membuat isolasi tidak mampu lagi menahan besarnya tegangan yang mengalir.

Adapun penyebab dari *flashover* dikarenakan tekanan udara, suhu ruangan dan jarak antar elektroda (Zhu et al., 2017). Definisi dari korona adalah sebuah peluahan muatan yang terus menerus dengan proses ionisasi pada lokasi tertentu karena adanya celah udara di antara peralatan yang tidak sesuai. Korona ditandai dengan adanya pancaran sinar berwarna biru ke abu-abuan pada batas antara konduktor dikarenakan medan listrik melebihi dari batas medan disruptif (*disruptif field*) udara di sekitar penghantar. Fenomena ini sering terjadi pada saat kondisi konduktor membawa beban tegangan ekstra tinggi (SUTET) dalam keadaan jarak berapa pun. Dari adanya fenomena tersebut mengakibatkan pihak penyuplai mengalami beberapa kerugian, adanya suara bising, percikan api, dll.

Efek korona biasanya mulai terlihat pada saluran udara yang melebihi dari 100 KV (Li et al., 2018). Dengan banyaknya penggunaan energi listrik membuat penyaluran semakin besar dengan adanya SUTET pada sistem transmisi menjadi penyebab utama adanya *corona*. Fenomena korona visual ditunjukkan oleh munculnya radiasi cahaya tampak, suara *hissing*, pembentukan ozon dan kehilangan daya. Dampak *corona* mempengaruhi lingkungan sekitar transmisi saluran udara dan pemadaman listrik di jalur tersebut. Penelitian ini membahas pengaruh suhu terhadap kemunculan *corona* dengan menggunakan metode kuantitatif dilakukan dengan menghitung nilai kepadatan udara relatif, tegangan kritis yang mengganggu, kehilangan daya dan energi *corona* (Masarrang et al., 2019).

Fenomena korona sendiri terjadi akibat adanya pelepasan muatan yang dikarenakan besarnya medan listrik antara, tahanan isolasi lebih kecil atau sama dengan besarnya medan listrik yang disalurkan (Pasra et al., 2018). Korona yang terjadi bila dikaitkan pada sistem distribusi dapat dilihat pada kubikel 20 kV yaitu dengan melihat tingkat kelembaban dan suhu yang mengakibatkan *discharge*, menjadi indikasi terjadi efek korona (FIKRI & CHRISTIONO, 2022; Prihatnolo et al., 2011). Menurut elemen distribusi medan listrik statis, nilai medan listrik di seluruh wilayah, saluran debit, permukaan elektroda dan jalur terpendek diekstraksi dan pasca-diproses, yang merupakan fitur medan listrik yang mengkarakterisasi struktur celah sehingga *discharge* dapat dideteksi (Refaat & Shams, 2018). Selain itu terbentuknya *discharge* ini bisa ditandai dengan adanya *treeing* pada isolasi, dan dengan adanya celah udara menyebabkan pola *partial discharge* (PD) menyerupai *void-discharge*. Sebelum inisiasi pohon, karakteristik debit berevolusi dengan peningkatan peningkatan tegangan dan peningkatan fase tertinggal di belakang tegangan yang diterapkan. Perubahan karakteristik PD ini mencerminkan perubahan dalam keadaan fisik celah udara (Syahbana, 2019).

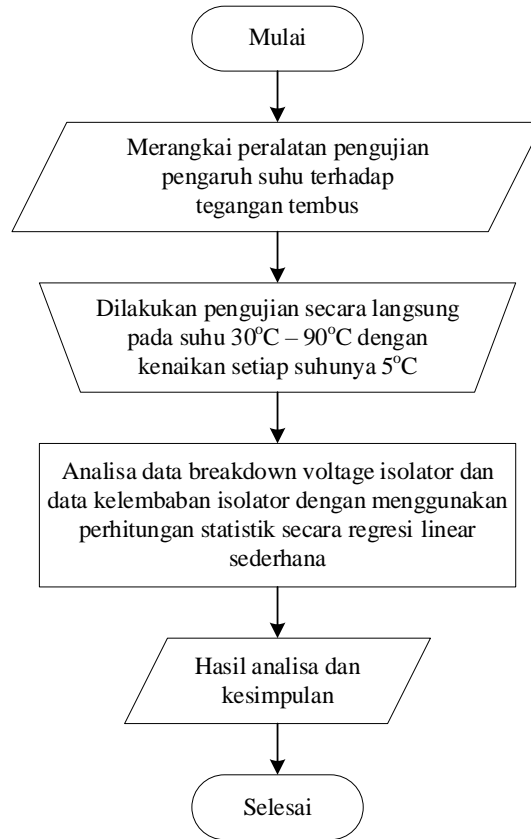
Pengujian tegangan tembus berdasarkan tingkat suhu bisa dilakukan dengan metode TEV untuk menentukan bahwa variabel yang diuji adalah *discharge* yang terjadi pada isolasi udara sehingga tepat sasaran, karena penting dilakukan kalibrasi terlebih dahulu selain menggunakan ultrasonik (Widyastuti & Dharma, 2019). Peristiwa korona ini akan mengakibatkan *breakdown* pada sistem isolasi dengan faktor penunjangnya yaitu suhu. Dengan demikian dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh tingkatan suhu terhadap karakteristik tegangan tembus pada isolasi udara dengan melakukan perubahan suhu dari 30°C–90°C dengan menggunakan pedoman dari (Prihatnolo et al., 2011) bahwa tegangan tembus dapat dipengaruhi oleh perbedaan suhu di mana ketika suhu pada udara terdapat kenaikan maka tegangan tembus yang di dapatkan akan semakin kecil.



Gambar 1. *Prototype* Laboratorium Pengujian Suhu terhadap *Breakdown Voltage* dan Kelembaban Isolator (FIKRI & CHRISTIONO, 2022).

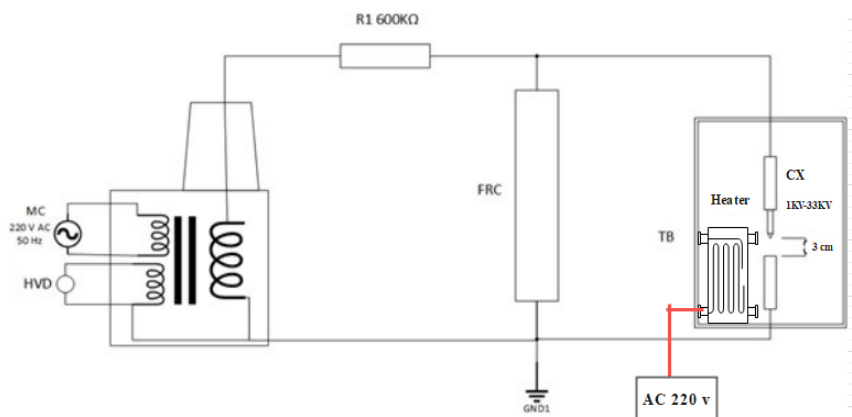
## 2. Metode

### 2.1. Teknik Pengambilan Data



Gambar 2. Flowchart Pengambilan Data Pengujian.

Pengujian ini dilakukan di laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi Institut Teknologi PLN Jakarta. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis fenomena suhu terhadap keandalan isolator. Pada flowchart di atas diterangkan bahwa pengujian dimaksudkan untuk mencari pengaruh suhu ketika adanya perubahan pada suhu 30°C – 90°C dengan kenaikan setiap suhunya 5°C. Setelah memperoleh hasil uji di atas maka dilanjutkan dengan analisis regresi linear. Konsep pengujian dapat diuraikan seperti pada gambar rangkaian percobaan seperti di bawah ini:



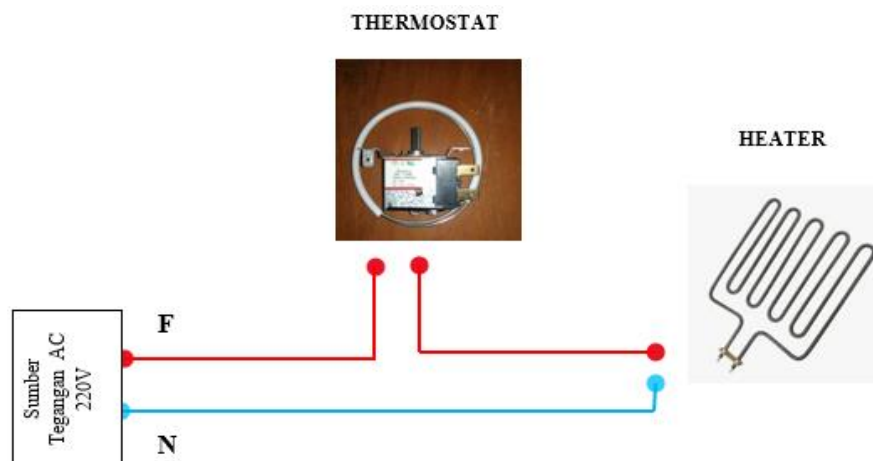
Gambar 3. Rangkaian Pengujian Pengaruh Suhu Terhadap Tegangan Tembus.

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengambilan data tersebut ialah HVD digunakan untuk membaca tegangan yang disuplai ke rangkaian pengujian, lalu ada MC 230V digunakan menyuplai tegangan yang akan diperbesar oleh trafo daya R1 600k untuk mengurangi arus yang mengalir sehingga tegangan yang menyuplai bisa maksimal. FRC untuk memperkecil arus-arus yang tersisa dan akan digrounding. *Grounding* membumikan arus sisa pada rangkaian. *Box Panel* untuk pengujian pada kubikel 20kV. *Heater* digunakan untuk memunculkan panas dan dapat dinaikkan suhunya. Elektroda untuk mengalirkan tegangan ke peralatan dengan jarak antar elektroda 3CM.



Gambar 4. Proses Pengujian.

Prinsip kerja pengujian di lakukan pada penelitian ini, menggunakan rangkaian gambar seperti di atas, rangkaian diberi suplai tegangan 220 VAC, tegangan tersebut lalu disalurkan menuju ke trafo daya, trafo tersebut memperbesar tegangan yang mengalir lalu tegangan masuk ke kontrol unit, fungsi dari kontrol unit ini adalah untuk mengontrol besar kecilnya tegangan sekunder pada trafo, lalu tegangan yang sudah di atur tadi akan mengalir juga melalui R1 atau CLR, pada komponen tersebut yang berfungsi untuk menurunkan arus yang besar ketika tegangan dibesarkan maka pada rangkaian menggunakan tegangan dengan meminimumkan arus maka tegangan yang mengalir akan semakin maksimal, lalu di FRC arus tadi disalurkan ke *grounding*, Lalu tegangan yang maksimal tadi akan disalurkan ke *Box uji* yang di dalamnya terdapat elektroda penguji dengan celah udara 3 cm, dan juga terdapat elemen *heater* pemanas ruangan, *heater* tersebut tegangannya berasal dari sumber yang berbeda agar pada saat pengujian tidak terjadi kecelakaan, untuk pengatur suhu udara panas menggunakan *thermostat* yang di rangkai di luar *box uji*, di dalam *box uji* juga terdapat *microphone* yang digunakan untuk perantara memperjelas suara dan merekam suara pada saat tegangan tembus, *microphone* tersebut nantinya akan disalurkan dengan *handphone* untuk menggunakan aplikasi perekamnya.



Gambar 5. Rangkaian *Heater*.

Cara pengambilan data penelitian ini menggunakan konsep perekaman dengan menggunakan *handphone* dan *microphone* yang sama dari pengujian awal, yang ditambah dengan menggunakan aplikasi peninjau seperti *wave editor*, proses pengujianya pertama alat yang di gunakan diberi tegangan suplai, setelah itu atur suhu pada *box* pengujian dari 30°C – 90°C, dengan kenaikan suhu 5°C, ketika suhu pada ruangan mencapai pada suhu 30°C pengujian dimulai dengan menaikkan tegangan secara bertahap pada *Control Unit* sampai dengan terjadinya kegagalan isolasi antara celah udara elektroda, ketika suhu 30°C ketahanan isolasi udaranya mencapai 33 KV, setelah itu lakukan pengujian selanjutnya dengan penambahan suhu 50°C, ketika suhu sudah diperbesar pada parameter 50°C, ketahanan isolasi atau tegangan tembusnya semakin menurun dengan nilai tegangan tembusnya 29 KV, kemudian ketika suhu sudah mencapai pada parameter 90°C, tegangan tembusnya semakin menurun sampai dengan nilai 23 KV, pengujian dilakukan secara berulang sebanyak 4 kali percobaan, dari 4 kali pengujian tersebut dapat dikatakan bahwa semakin besar suhu *box* penguji maka tegangan tembus pada *box* ujinya semakin menurun.

Setelah dilakukan percobaan seperti di atas, dan didapatkan suhu, kelembaban dan tekanan udara maka dapat diukur dengan menggunakan metode faktor koreksi perubahan suhu dengan rumus (Zhu et al., 2017).

$$K_{p.t} = \frac{P_0(273,2 + T)}{P(273,2 + T_0)} \quad (1)$$

## 2.2. Tegangan Tembus Isolasi Udara

Dalam proses kegagalan isolasi elektron tunggal yang bebas bukan karena proses ionisasi dapat menimbulkan banjir elektron (*avalanche*), merupakan kelompok elektron yang bergerak meninggalkan lintasan ionya yang semakin lama akan semakin bertambah banyak secara cepat. Terdapat 2 jenis strimer pada peluahan ini yaitu peluahan positif merupakan strimer akan mengarah ke katoda dan peluahan negatif merupakan strimer akan menuju ke anoda.

Jika tegangan yang disalurkan melebihi tegangan tembus statisnya maka pada dalam sekejap di antara sela akan muncul percikan api. Selama sekejap itu puncak tegangan saluran dapat dianggap konstan, maka dari itu tembus isolasi gas selalu terjadi pada saat puncak tegangan AC frekuensi rendah. Dalam gambar 3 menunjukkan adanya 2 susunan sela bola yang di ukur, untuk susunan horizontal digunakan untuk diameter  $D < 50$  cm dalam rentan tegangan yang rendah sedangkan untuk diameter lebih lebar digunakan susunan vertikal. Sejumlah baku (VDE 0433-2; IEC- Publ.52; BS 358) menyatakan jarak bebas antara penghantar minimum tegangan tembus pada kondisi baku adalah ( $b = 1013$  mbar,  $v = 20^\circ\text{C}$ ) dengan berbagai diameter bola dan sela yang berubah :  $U_{do} = f(D, s)$ .

## 2.3. Elektroda

Pada pengujian tegangan tembus ini elektroda yang digunakan merupakan elektroda jarum dan batang, dengan bahan *stainless steel*, dengan jarak celah udaranya 3 cm dengan tegangan tembus normal sekitar 30-33kV, pengaruh jarak celah udara antar konduktor berpengaruh besar terhadap tegangan tembus, di mana ketika semakin jauh jarak celah udaranya maka tegangan tembusnya akan semakin besar.



Gambar 6. Elektroda Jarum dan Batang.

## 2.4. Peralatan dan Bahan Pengujian

Pada pengujian yang dilakukan di laboratorium teknologi dan peralatan tegangan tinggi Institut Teknologi PLN Jakarta, dengan peralatan yang digunakan yaitu: terdapat sumber tegangan 220VAC, Trafo *step up* 220 VAC-150 VAC berfungsi menaikkan tegangan, *control* unit untuk mengatur besarnya tegangan yang akan disuplai ke trafo *step up*, CLR (*Current Limiting Resistor*) untuk menghambat arus supaya tegangan bisa maksimal, HVD (*High Voltage Divider*) digunakan untuk mengukur tegangan trafo sekunder sampai 150 kV, *Box testing* untuk menyimulasikan kubikel 20 kV, *heater* dan thermostat untuk membangkitkan panas yang dapat diubah berada di dalam kubikel atau *box testing*, Thermometer untuk mengukur suhu yang ada di dalam *box testing* yang di ubah sampai  $90^\circ\text{C}$ , *Microphone* untuk media perantara memperjelas suara korona dan mendeteksi gelombang koronanya, *hanphone* dan aplikasi *wave editor* untuk merekam dan menampilkan gelombang pengujian.

## 2.5. Metode Regresi Linear

Analisis regresi merupakan salah satu metode analisis data dalam statistika yang sering kali digunakan untuk menguji hubungan antara beberapa variabel dan meramal suatu variabel (Kutner et al., 2004). Menurut (Iriawan & Astuti, 2006) analisa regresi linear sangat berguna dalam penelitian, yaitu: (1) model regresi dapat digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara variabel respon dan variabel prediktor, (2) model regresi dapat digunakan untuk mengetahui pengaruh suatu atau beberapa pengaruh suatu atau beberapa variabel prediktor terhadap variabel respon, (3) model regresi berguna untuk memprediksi pengaruh suatu variabel atau beberapa variabel prediktor terhadap variabel respon. Persamaan regresi yang menggambarkan hubungan antara satu peubah bebas (X) dan satu peubah tak bebas (Y), di mana hubungan keduanya digambarkan sebagai garis lurus disebut regresi linear sederhana. Persamaan umum regresi linear dalam penelitian ini adalah (Muttaqin & Srihartini, 2022):

$$y = a + bx \tag{2}$$

### 2.6. Pengujian Keakurasian

Ada beberapa cara menghitung besarnya kesalahan, adapun beberapanya adalah *mean square error* (MSE), *root mean square error* (RMSE), dan *mean absolute percentage error* (MAPE). MSE adalah perataan selisih kuadrat antara data yang diprediksi dengan yang diamati, RMSE merupakan akar dari MSE, dan MAPE merupakan rata-rata diferensiasi absolut antara nilai yang diprediksi dan aktual, hasil prediksi yang baik adalah jika MAPE kurang dari 10% (Ayuni & Fitriyah, 2019). Rumus dari ketiga pengujian ini sebagaimana ditampilkan pada Persamaan 3, 4, dan 5 di bawah ini.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (Y_t - Y'_t)^2 \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_t - Y'_t)^2} \tag{4}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - Y'_t|}{Y_t} \tag{5}$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian pengaruh suhu terhadap tegangan tembus isolasi udara yang dilakukan dapat terlihat pada data pengamatan sebagai berikut:

Tabel 1. Data BDV dengan Kenaikan Suhu.

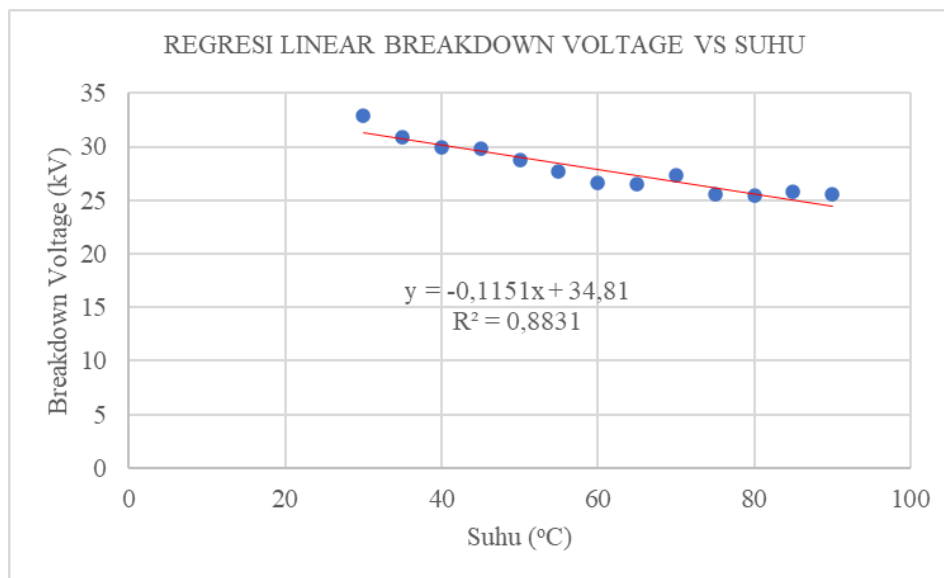
SUHU	BREAKDOWN VOLTAGE					RATA-RATA
	A (KV)	B (KV)	C (KV)	D (KV)	E (KV)	
30	35,33	32,67	32,67	31,98	31,72	32,874
35	33,74	32,9	31,09	28,89	28,09	30,942
40	32,64	32	30,04	27,89	27,02	29,918
45	32,09	32,48	28,81	28,38	27,1	29,772
50	32,32	32,06	26,9	25,04	27,64	28,792
55	29,36	31,99	25,88	25,85	25,56	27,728
60	28,89	31,27	25,34	25,06	22,57	26,626
65	29,2	29,77	24,52	24,59	24,34	26,484
70	30,22	29,52	27,19	25,62	24,23	27,356
75	30,03	27,7	24,24	23,06	22,55	25,516
80	29,55	30	22,67	23,45	21,37	25,408
85	30,3	28,93	24,4	22,9	22,55	25,816
90	30,21	28,89	23,83	21,7	22,9	25,506

Dari tabel 1 data pengamatan diatas diberikan pengaruh berupa efek suhu yang meningkat yang dimulai dari 30°C hingga 90°C pada Isolator A, Isolator B, Isolator C, Isolator D, dan Isolator E, dimana terlihat nilai rata-rata *breakdown voltage* menurun secara signifikan setelah dipengaruhi suhu yang diberikan. Selanjutnya diperoleh data kelembaban dari setiap isolator yang terkena efek suhu yang dapat dilihat pada tabel 2. Dianalisa bahwa suhu dapat mempengaruhi kelembaban isolator yang diuji, terlihat setiap kenaikan suhu maka kelembaban menurun signifikan. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Khriswanti et al., 2022) membuktikan suhu dan kelembaban mempunyai sifat yang tidak sama dan karakteristiknya selalu berbanding terbalik.

Tabel 2. Data Suhu dan Kelembaban.

SUHU	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)
30	63	67	72	71	65
35	58	65	62	70	63
40	55	55	53	65	59
45	50	50	51	61	55
50	45	47	49	50	50
55	42	43	48	40	46
60	33	40	44	39	39
65	34	37	41	39	35
70	33	35	38	33	33
75	32	33	35	31	30
80	30	32	33	29	28
85	29	29	29	28	26
90	28	29	28	25	25

Dengan menggunakan data yang terdapat pada Tabel 2, maka dilanjutkan melihat grafik nilai pengujian suhu terhadap nilai *Breakdown voltages* (kV) di bawah ini:



Gambar 7. Grafik Regresi Linear.

Pada grafik di atas dapat dilihat disaat pengujian awal tegangan tembus isolasinya sebesar 33 KV, kemudian semakin besar kenaikan suhunya semakin cepat pula tegangan tembus yang diperoleh dapat dilihat pada grafik penurunan suhu pada saat suhu 50°C tegangan tembus isolasinya juga semakin cepat berkisar pada 27KV, kemudian suhu dinaikkan lagi pada 90°C yang mengakibatkan tegangan tembusnya semakin cepat berkisar 22KV, maka dari data yang diambil dengan menggunakan model analisis regresi linear ini berdasarkan grafik tegangan tembus (y) terhadap suhu (x) tersebut, diperoleh persamaan regresi linear sebagai berikut  $y = -0.1151x + 34.81$ . Analisis ini memiliki bentuk grafik menurun dapat disimpulkan bahwa pengaruh suhu terhadap tegangan tembus sangat berpengaruh karena pada grafik menjelaskan, semakin besar kenaikan suhu pada suatu tempat maka tegangan tembus isolasinya juga akan semakin cepat menurun.

Kemudian dapat dilihat korelasi antara suhu terhadap tegangan tembus sebesar  $R^2=0,8384$ . Dapat dilihat didapatkan nilai korelasi sebesar 0,8831 yang hampir mendekati 1 yang artinya faktor pengaruh suhu terhadap tegangan tembus sebesar 88,3% dan 11,7% dipengaruhi oleh faktor lain.

Di dalam model ini kita perlu mengetahui seberapa besar nilai keakurasiannya dengan menggunakan MAPE, MAPE merupakan ukuran akurasi relatif yang digunakan untuk mengetahui persentase penyimpangan dari suatu model. MAPE didefinisikan dari persamaan (4) sehingga diperoleh tabel 3 sebagai berikut.



Tabel 3. Perhitungan Akurasi Pemodelan Regresi Linear Sederhana.

X (suhu)	Y (kV)	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}^2$	Residu	% Error	ABS
30	32,874	31,357	2,301289	1,517	0,046146	5%
35	30,942	30,7815	0,02576025	0,1605	0,005187	1%
40	29,918	30,206	0,082944	-0,288	-0,00963	1%
45	29,772	29,6305	0,02002225	0,1415	0,004753	0%
50	28,792	29,055	0,069169	-0,263	-0,00913	1%
55	27,728	28,4795	0,56475225	-0,7515	-0,0271	3%
60	26,626	27,904	1,633284	-1,278	-0,048	5%
65	26,484	27,3285	0,71318025	-0,8445	-0,03189	3%
70	27,356	26,753	0,363609	0,603	0,022043	2%
75	25,516	26,1775	0,43758225	-0,6615	-0,02592	3%
80	25,408	25,602	0,037636	-0,194	-0,00764	1%
85	25,816	25,0265	0,62331025	0,7895	0,030582	3%
90	25,506	24,451	1,113025	1,055	0,041363	4%
<i>AVERAGE</i>						2,38%

Pada pengujian dengan menggunakan metode regresi linear ini didapatkan nilai MAPE sebesar 2,38% dengan *error* sekecil itu kita dapat menyatakan bahwa model yang kita gunakan sudah cukup baik untuk tingkat keakurasianya, dengan nilai keakurasianya sebesar 97,62%.

### Kesimpulan

Pengaruh perubahan suhu pada daerah tropis dapat mempengaruhi keandalan isolasi udara pada sistem distribusi. Peralatan yang digunakan dalam pengambilan data adalah HVD digunakan untuk membaca tegangan yang disuplai ke rangkaian pengujian, maka dilakukan pengujian secara langsung dengan memberikan variasi suhu berkisar 30°C – 90°C. Untuk melihat fenomena secara jelas maka pengujian dilakukan setiap kenaikan suhu 5°C. Hasil penelitian dapat dilihat pada grafik terdapat penurunan nilai *breakdown* tampak jelas pada suhu 50°C yang mengakibatkan tegangan tembus isolasinya menurun hingga 27kV. Selanjutnya suhu dinaikkan hingga 90°C yang mengakibatkan tegangan tembus isolasinya menurun hingga 22kV. Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin besar kenaikan suhu maka semakin cepat pula tegangan tembus yang diperoleh. Pengujian menunjukkan bahwa semakin besar kenaikan suhu maka semakin cepat pula tegangan tembus yang dapat diketahui menurut hasil data penelitian yang telah dilakukan didasari dengan menggunakan metode analisis regresi linear yang di dapatkan MAPE sebesar 2,38% sehingga diperoleh tingkat akurasi sebesar 97,62%, dan korelasinya yang bernilai 0,8831, artinya mendekati 1 didapatkan bahwa semakin besar kenaikan suhu akan berpengaruh kepada tegangan tembusnya akan semakin cepat.

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi yang telah memberikan dukungan dan penggunaan fasilitas pengujian selama proses penelitian berjalan, Terima kasih Kepada Institut Teknologi PLN atas segala dukungan yang telah di berikan sehingga penelitian ini dapat selesai dengan baik.

### Daftar Notasi

- A = Konstanta
- b = Koefisien regresi
- Y. = Variabel *dependen* (variabel tak bebas / *Breakdown Voltage*)
- X. = Variabel *independen* (variabel bebas / Suhu)
- MAPE= *Mean absolute percentage error*
- R = Nilai korelasi
- RMSE= *Root mean square error*
- MSE = *Mean square error*

### Daftar Pustaka

- Abugalia, A. (2019). Effect of corona on the wave propagation along overhead transmission lines. *Acta Electronica Malaysia*, 3(1), 06-09.
- Akhir, P., Darmawan, L. D., Studi, P., Teknologi, D., Ketenaga, F., & Dan, L. (2021). *Proyek akhir*.
- Alfiandy, S., Rangga, I. A., & Permana, D. S. (2022). Pattern of Increasing Air Temperature Based on BMKG and ERA5 Data in Central Sulawesi Province. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 19(1), 63-70.
- Ayuni, G. N., & Fitriannah, D. (2019). Penerapan metode Regresi Linear untuk prediksi penjualan properti pada PT XYZ. *Jurnal telematika*, 14(2), 79-86.

- FIKRI, M., & CHRISTIONO, C. (2022). Clustering Fenomena Corona Discharge berdasarkan Suara menggunakan Metode LPC dan Euclidean Distance. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 10(3), 689.
- Ge, X., Ding, Y., Yao, X., Lv, F., & Yang, B. (2020). Computation of breakdown voltage of long rod-plane air gaps in large temperature and humidity range under positive standard switching impulse voltage. *Electric Power Systems Research*, 187, 106518.
- Guerra-Garcia, C., Nguyen, N., Mouratidis, T., & Martinez-Sanchez, M. (2020). Corona discharge in wind for electrically isolated electrodes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2020JD032908.
- Haddin, M., & Bahtiar, A. (2018). Rugi Daya Dan Energi Akibat Korona Pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 Kv. *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, 6(2), 225-237.
- Harinata, I. M. D., Ilham, J., & Yusuf, T. I. (2019). Karakteristik Tegangan Tembus Isolasi Cair dan Isolasi Udara pada Beberapa Perubahan Suhu dan Diameter Elektroda. *Jurnal Teknik*, 17(1), 1-18.
- Iriawan, N., & Astuti, S. P. (2006). Mengolah data statistik dengan mudah menggunakan minitab 14. *Yogyakarta: Andi*.
- Khriawanti, J. T., Fitriyah, H., & Prasetio, B. H. (2022). Sistem Pengendali Suhu dan Kelembaban Udara Prototipe Greenhouse pada Tanaman Hidroponik menggunakan Metode Regresi Linier Berganda berbasis Arduino. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer e-ISSN*, 2548, 964X.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Wasserman, W. (2004). *Applied linear regression models* (Vol. 4). McGraw-Hill/Irwin New York.
- Li, X., Wang, J., Lu, T., & Cui, X. (2018). Statistical analysis of audible noise generated by AC corona discharge from single corona sources. *High voltage*, 3(3), 207-216.
- Masarrang, R., Patras, L. S., & Tumaliang, H. (2019). Efek korona pada saluran transmisi gardu induk Tello Sulawesi Selatan. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 8(2), 67-74.
- Mustamin, M. (2011). *Karakteristik Isolator Polimer Tegangan Tinggi di Bawah Penuaan Tekanan Iklim Tropis Buatan yang Dipercepat* Universitas Hassanuddin].
- Muttaqin, Z., & Srihartini, E. (2022). Penerapan Metode Regresi Linier Sederhana Untuk Prediksi Persediaan Obat Jenis Tablet. *JSiI (Jurnal Sistem Informasi)*, 9(1), 12-16.
- Pasra, N., Makulau, A., & Abriyanto, M. O. (2018). Analisa Efek Korona Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik 20 kV Pada Gardu Beton. *SUTET*, 8(2), 103-113.
- Prihatnolo, S. T., Syakur, A., & Facta, M. (2011). *Pengukuran Tegangan Tembus Dielektrik Udara pada Berbagai Sela dan Bentuk Elektroda dengan Variasi Temperatur Sekitar Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik*].
- Refaat, S. S., & Shams, M. A. (2018). A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables. 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018),
- Syahbana, R. (2019). Analisa Terbentuknya Korona Pada Saluran Kubicle Tegangan 20Kv Serta Pengaruhnya Terhadap Rugi-Rugi Daya. *Lensa*, 2(48), 14-21.
- Widyastuti, C., & Dharma, I. N. B. Y. (2019). Dampak Korona pada SUTET 500 kV Terhadap Radio Interference: Dampak Korona pada Sutet 500 kV Terhadap Radio Interference. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 11(2), 87-97.
- Zhu, M. X., Wang, Y. B., Liu, Q., Zhang, J. N., Deng, J. B., Zhang, G. J., Shao, X. J., & He, W. L. (2017). Localization of multiple partial discharge sources in air-insulated substation using probability-based algorithm. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), 157-166. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005964>



## Analisis Kekuatan Struktur Pasca *Retrofitting* pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang

Luluk Kristanto<sup>1</sup>, Sumargo<sup>1</sup>, dan Muhammad Iqbal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[mrluke.014@gmail.com](mailto:mrluke.014@gmail.com), [sumargo@lecture.unjani.ac.id](mailto:sumargo@lecture.unjani.ac.id), [muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id](mailto:muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id)

### Abstrak

Adanya permasalahan kerusakan struktur yang melebihi ketentuan, menyebabkan *retrofit* menjadi alternatif terbaik dibandingkan metode konvensional. Penelitian eksperimental untuk mengetahui parameter kerusakan, kapasitas desain FRP StrongGlass E450 sebagai bahan *retrofit* dan perilaku balok beton bertulang pasca retrofitting. Hasil Hammer Test balok *existing*  $h_{lap}$  (270 mm) <  $h_{min}$  (286 mm), mutu beton terkecil K.408 belum mencerminkan perilaku daktail balok *existing* pada kondisi retak dan lendutan melebihi ijin. Kerusakan belum menyebabkan keruntuhan, di mana hasil uji tarik nilai  $f_y$  rata-rata 348,47MPa dan  $f_u$  rata-rata 491,32MPa masih melebihi batas minimum sehingga BjTP 12 terpasang berkontribusi maksimal pada daktilitas balok. Kemiripan nilai lendutan hasil analisis teoritis dan SAP 2000, maka permodelan SAP 2000 digunakan dalam desain FRP, di mana tipe StrongGlass E450 jumlah 1 lapis, lebar 200 mm sepanjang 3 balok uji memenuhi syarat kuat lentur, kuat geser, dan lendutan. Pasca uji pembebanan dengan beban pasir seberat 4200 Kg (meningkat 25,98 %) dalam 3 tahap, kuat tarik balok retrofit max 117,325 MPa (meningkat 23,879 %) dan regangan max. 0,00154 mengindikasikan balok belum mencapai luluh. Pasca injeksi pada retakan turut mempengaruhi kekakuan balok terhadap lendutan, saat pra-*retrofit*  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm), serta pasca *retrofit*  $\Delta P1$  (-30,8 mm) dan  $\Delta P2$  (-34,2 mm).

Kata kunci: FRP tipe *strong glass* E450, *retrofitting*, uji pembebanan.

### Abstract

The provisions exceed of crack and deflection problems, causing retrofit as best alternative methods more than the conventional. This experimental research determines damage parameters, FRP StrongGlass E450 retrofits design capacity and the behavior of reinforced concrete beams post-retrofitting. Hammer Test results for existing beams with  $h_{lap}$  (270 mm) <  $h_{min}$  (286 mm), the minimum concrete quality K.408 not reflecting beam ductile behavior that exceed of allowable cracked and deflection conditions. It has not yet caused collapse, where the tensile test results with  $f_y$  average 348,47 MPa and  $f_u$  average 491,32 MPa still exceed the minimum strength, so the BjTP 12 installed contributes maximum for beam ductility. The similarity field deflection values with theoretical analysis and SAP 2000, made SAP 2000 modeling as FRP design, where 1 layer StrongGlass E450, 200 mm wide along 3 beams object, fulfilling flexural strength requirements, shear strength and deflection. Loading test post with sand weighing 4200 Kg (increased 25,98%) in 3 stages, the tensile strength increased 23,879% (117,325 MPa) and strain max. 0,00154 indicates the beam before yielded. Post-density injection could be affects beam stiffness on deflection, pre-retrofit  $\Delta P1$  (-34 mm) and  $\Delta P2$  (-37 mm), and post-retrofit  $\Delta P1$  (-30,8 mm) and  $\Delta P2$  (-34,2 mm).

Keywords: FRP StrongGlass E450 Type, load test, retrofitting

### 1. Pendahuluan

Struktur bangunan yang telah direncanakan dengan baik dan dibangun, terkadang setelah difungsikan mempunyai beberapa permasalahan. Visual awal kerusakan pada objek penelitian balok beton bertulang nonprategang bangunan masjid pedesaan, memiliki permasalahan kerusakan yang melebihi batas ketentuan, sehingga berpotensi buruk terhadap keselamatan jiwa pengguna hingga kegagalan struktur bila ditingkatkan fungsionalnya secara vertikal. Seiring dengan kemajuan teknologi material konstruksi yang lebih bersifat ringan dan kuat, maka metode perbaikan secara konvensional secara perlahan mulai bergeser ke metode yang lebih modern. Hal ini untuk lebih mengefisienkan tenaga, biaya, dan waktu sehingga diperlukan perkuatan atau perbaikan struktur (Derianto R.P. dkk., 2022).

Salah satu teknologi material utama *Retrofit* adalah *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* tipe *StrongGlass* E450. Kelebihan dari spesifikasi bahan ringan, kuat tarik tinggi, pelaksanaan lebih cepat, tidak memerlukan area kerja luas dan tahan terhadap korosi, sebagai perkuatan telah terbukti secara eksperimental oleh Tavio dkk., 2022; Ridwan dkk., 2022, Pranata dkk., 2022; Luastika dkk., 2019; Nalarita dkk., 2019; Yusfar, 2018; Parannuan, 2017; dan Parmo dkk., 2014, dimana peningkatan kekuatan dan daktilitas pada balok beton bertulang.

#### Info Makalah:

Dikirim : 02-20-23;  
Revisi 1 : 04-18-23;  
Revisi 2 : 06-06-23;  
Revisi 3 : 06-27-23;  
Diterima : 07-12-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -  
e-mail : [mrluke.014@gmail.com](mailto:mrluke.014@gmail.com)

Penelitian Ridwan dkk. (2022), dimana penurunan tegangan pada baja akan menurunkan kapasitas balok dalam menahan lentur. Perkuatan GFRP-S pada balok beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas balok 12,07 % dibanding balok normal. Balok perkuatan dengan tulangan terkorosi selama 2 minggu, 4

minggu dan 6 minggu mempunyai peningkatan kapasitas 5,17%; 3,45% dan 1,38% dibanding balok normal.

Penelitian tentang pengaruh dua jenis produk GFRP yakni produk A dari FYFE Type SHE-51A *Composite* dan produk B dari Estop Tipe *EstoGlass*, dimana hasil penelitian didapat bahwa terjadinya peningkatan kekuatan pada balok yang telah dilapisi dengan GFRP. Produk A terjadi peningkatan kekuatan sebesar 10,72% dari balok normal dan untuk produk B terjadi peningkatan kekuatan sebesar 24,15 % dari balok normal (Yusfar, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui parameter kerusakan pada balok beton bertulang *existing*, kapasitas desain FRP tipe *StrongGlass* E450 dalam *retrofit* dan perilaku balok beton bertulang *existing* pasca *retrofitting*.

## 2. Metode

Eksperimental digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini, dan sebagai pendekatan penyelesaian permasalahan kerusakan struktur balok beton bertulang *existing* yakni rangkaian pengujian di lapangan meliputi:

### 2.1. Parameter Kerusakan

- 1) Uji kekuatan beton, menggunakan *Non Destructive Test* (NDT) yakni *Schmidt Hammer Test* mengacu pada SNI 03-4430-1997.
- 2) Uji tarik baja tulangan, menggunakan *Destructive Test* (NDT) yakni Mesin Uji Tarik dengan cara uji mengacu pada SNI 8389: 2017 dan cara pengambilan contoh mengacu SNI 2052: 2017.

### 2.2. Proses Retrofit

- 1) Perbaikan retak pada balok beton bertulang dilakukan dengan injeksi bertekanan menggunakan *nozzle* sehingga balok beton bertulang kembali padat. Acuan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022*.
- 2) Desain kapasitas FRP tipe *StrongGlass* E450 sebagai bahan *retrofit*, meliputi kuat lentur, kuat geser dan lendutan, menggunakan acuan ACI-440.2R-08, SNI 2847: 2019 dan *Estrong Technical Data Sheet 2022*.
- 3) *Retrofit* metode *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai tambahan perkuatan, diaplikasikan pada 3 (tiga) jalur balok *existing* B2 (Balok EG3, EG4 dan F25) mengacu Gambar 4, dengan komposisi bahan meliputi:
  - a) FRP tipe *StrongGlass* E450 pada permukaan bagian bawah balok beton untuk membantu menahan momen lentur. Acuan pelaksanaan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022* (Tabel 1).
  - b) *Epoxy*, sebagai bahan pengikat untuk aksi komposit beton dan FRP tipe *StrongGlass* E450. Acuan pelaksanaan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022* (Tabel 2).

Tabel 1. Karakteristik *StrongGlass* E450

<i>Properties</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<b><i>Fiber Material</i></b>		
<i>Tensile Strength</i>	MPa	2.300
<i>Modulus Elasticity</i>	Gpa	76
<i>Elongation at Break</i>	%	3,0
<b><i>Composite Material</i></b>		
<i>Tensile Strength</i>	MPa	580
<i>Modulus Elasticity</i>	Gpa	31
<i>Elongation at Break</i>	%	0,5
<b><i>Fabric</i></b>		
<i>Glass Fabric Weight</i>	g/m <sup>2</sup>	450
<i>Glass Fabric Thickness</i>	mm	0,17

Tabel 2. Karakteristik *StrongWrap Primer*

<i>Properties (Unit)</i>	<i>Value</i>
<i>Adhesive Strength (MPa)</i>	> 3.5 ( <i>concrete failure</i> )
<i>Shear Strength (MPa)</i>	> 30
<i>Compressive Strength (MPa)</i>	> 65
<i>Flexural E-Modulus (MPa)</i>	> 3600
<i>Flexural Strength (MPa)</i>	> 40
<i>Elongation at Break (%)</i>	> 1,0
<i>Viscosity (cps@ 25°)</i>	< 1000
<i>Application Temperature (°C)</i>	20 ~ 45
<i>Package</i>	<i>Hardner (5 Kg), Base Resin (10 Kg)</i>
<i>Mixing ratio</i>	1 : 2

### 2.3. Perilaku Pasca Retrofitting

- 1) Uji Pembebanan dengan beban pasir, mengacu SNI 03-6760-2002 dan besaran pembebanan mengacu SNI 1727: 2020.
- 2) Pengujian menggunakan beberapa alat uji jenis *Non Destructive Test*:
  - a) Uji Lendutan, menggunakan alat *Linear Variabel Differential Transformer (LVDT)*.
  - b) Uji Regangan, menggunakan *Strain Gauge*.
  - c) Acuan melaksanakan berdasar pada SNI 03-6760-2002 dan ACI 437R-03.

### 2.4. Permodelan Struktur

Permodelan Struktur dengan Elemen Hingga yakni *Software SAP 2000* sebagai perbandingan analisis hasil pengujian lapangan dan analisis teoritis.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Kondisi Kerusakan Existing

Untuk mendapatkan hipotesa awal dari data kerusakan hasil pengamatan secara visual maka perlu dikaji dengan menggunakan literatur terkait terhadap data kerusakan aktual.

- 1) Keretakan.

Retak aktual dengan lebar melebihi batas max. 0,3 mm (SNI 2847: 2019) dan 0,41 mm (ACI 224R-01 dalam ACI 318R-19) dalam Tabel 3, sehingga retak aktual 1-2 mm tidak wajar dan menimbulkan keraguan saat lantai diberikan beban layan rencana. Maka perlu upaya memperbaiki kerusakan dan meningkatkan kapasitas balok.

Tabel 3. Panduan Lebar Retak yang Wajar pada Beton Bertulang Dibawah Beban Layan (ACI 224R-01)

<i>Exposure Condition</i>	<i>Crack width</i>	
	<i>in.</i>	<i>mm</i>
<i>Dry air or protective membrane</i>	0,016	0,41
<i>Humidity, moist air, soil</i>	0,012	0,30
<i>Deicing chemicals</i>	0,007	0,18
<i>Seawater and seawater spray, wetting and drying</i>	0,006	0,15
<i>Water-retaining structures</i>	0,004	0,10

- 2) Lendutan.

Titik acu "0" pada P3 (Gambar 4) maka lendutan P1 (-34 mm) dan lendutan P2 (-37 mm) dari balok struktur lantai yang hanya bekerja berdasar berat sendiri, mengacu SNI 2847: 2019 telah melampaui lendutan ijin, karena:

- a) Tinggi minimum balok beton bertulang nonprategang pada perlekatan menerus dua sisi ( $L/21$ ) bentang terpendek  $L$  6000 mm adalah  $h_{\min}$  286 mm  $>$   $h_{\text{balok}}$  270 mm.
- b) Lendutan ijin maksimum pada lantai ( $L/360$ ) bentang terpanjang  $L$  9000 mm,  $\Delta_{\text{ijin}}$  yakni 25 mm, maka perlu upaya memperbaiki kerusakan dan meningkatkan kapasitas balok.

Tabel 4. Tinggi Minimum Balok Nonprategang (SNI 2847: 2019)

Kondisi Perletakan	Minimum
Perlekatan sederhana	$1/16$
Menerus satu sisi	$1/18,5$
Menerus dua sisi	$1/21$
Kantilever	$1/8$

Tabel 5. Lendutan Ijin Maksimum (SNI 2847: 2019)

Jenis komponen struktur	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat $L_r$ dan $R$ maksimum	$l/180^{(1)}$
Lantai		Lendutan seketika akibat $L$	$l/360$

### 3.2. Parameter Kerusakan

- 1) Hasil *Hammer Test* pada Tabel 6, nilai kuat tekan balok terpasang EG3 K.460 kg/cm<sup>2</sup>, EG4 K.408 kg/m<sup>2</sup> dan F25 K.478 kg/cm<sup>2</sup>, memiliki kuat mutu  $>$  kuat mutu K.275. Pada dasarnya hasil *Hammer Test* hanya mengindikasikan kekerasan permukaan saja, dan hasil yang didapat dari kuat tekan balok terpasang jauh melebihi kuat mutu desain beton *existing*, maka belum bisa dijadikan sebagai tolok ukur nilai mutu beton secara keseluruhan. Namun bila diasumsikan sebagai nilai kuat tekan yang sebenarnya, meningkatnya mutu beton tidak berpengaruh signifikan dalam menentukan kekakuan/ketegaran lentur balok. Berdasarkan SNI 2847:

2019, dimana ukuran balok  $h_{lap}$  270 mm terhadap  $h_{min}$  286 mm, sehingga  $h_{lap} < h_{min}$ , maka terhadap dimensi balok beton yang kurang dari ketentuan akan berpengaruh terhadap kekuatan beton sehingga timbul lendutan dan retak. Timbulnya keretakan, mengindikasikan kuat tekan beton terlampaui dan kinerja balok sepenuhnya beralih pada baja tulangan.

Tabel 6. Rekapitulasi *Hammer Test* (5 Titik Uji) dan Posisi Uji

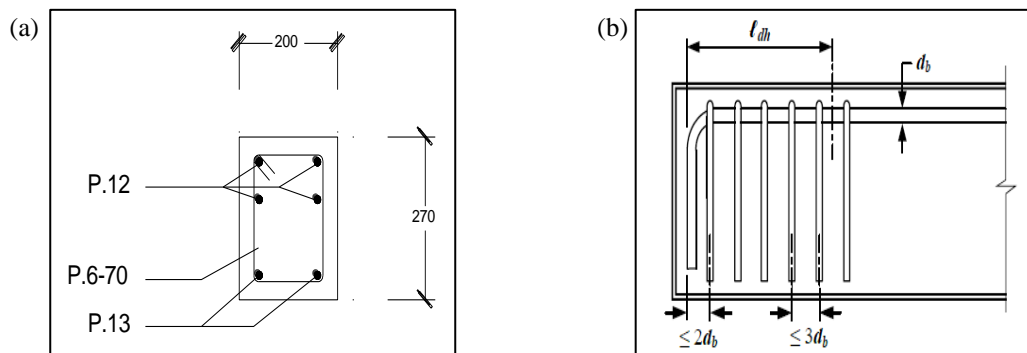
KODE	$f'_c$ MPa	$K_{lap}$ Kg/cm <sup>2</sup>	$K_{desain}$ Kg/cm <sup>2</sup>	SKEMA BALOK UJI
EG3 (R1)	45	460	275	
EG4 (R2)	40	408	275	
F25 (R3)	47	478	275	
E25 & G25 (R4)	51	519	275	
EG2 & EG5 (R5)	39	398	275	

- 2) Hasil Uji Tarik pada Tabel 7, dimana  $B_jTP$  12 dengan nilai kuat luluh/leleh sebesar 349,96 MPa; 351,37 MPa; dan 344,08 MPa serta rata-rata sebesar 348,47 MPa, memenuhi syarat kuat luluh/leleh min. 280 MPa dan max. 405 MPa (SNI 2052: 2017), berarti baja tulangan uji seharusnya masih berperilaku cukup elastis untuk memberikan daktilitas balok beton. Kuat tarik yang disyaratkan SNI 2052:2017 untuk kelas  $B_jTP$  280 adalah minimal sebesar 350 MPa, sehingga hasil uji terhadap kuat tarik dengan rata-rata sebesar 491,32 MPa mengindikasikan baja tulangan memiliki kuat tarik yang cukup dalam menahan beban layan yang ada. Kondisi lendutan balok pada P1 (34 mm) dan P2 (37 mm) telah melampaui lendutan ijin (24,375 mm) dan belum mengalami keruntuhan, maka balok beton bertulang terpasang membuktikan berperilaku cukup daktil secara maksimal. Tinjauan tinggi balok  $h_{lap}$  270 mm  $<$   $h_{min}$  yakni 286 mm (bentang balok terpendek  $L$  adalah 6000 mm), maka inersia yang dimiliki cukup kecil dan kekakuan balok akan kecil pula. Kekakuan yang kecil makin melipat gandakan beban kerja baja tulangan yang ada. Diameter baja  $B_jTP$  terpasang (diameter terbesar 11,33 mm) belum memenuhi batas bawah toleransi  $\pm 0,4$  mm untuk  $B_jTP$  12 yakni 11,6 mm. Luas tulangan makin mengecil akan berpengaruh berkurangnya kapasitas kuat tarik dalam memikul beban layan.

Tabel 7. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan  $\varnothing 12$  mm

Sampel	Diameter (mm)	Luas Tampang (mm <sup>2</sup> )	P Leleh (N)	P Max (N)	$f_y$ (MPa)	$f_{max}$ (MPa)
1	11,22	98,912	34602	48462	349,96	490,14
2	11,33	100,861	35426	49930	351,37	495,24
3	11,22	98,912	34020	48307	344,08	488,58
<b>Rataan</b>					<b>348,47</b>	<b>491,32</b>

- 3) Hasil data primer penelitian, selain As tulangan terpasang yang berkurang, tidak adanya penyaluran geser di bagian dalam pertemuan balok (P1 dan P2) hingga sejauh  $l_{dh}$ , dimungkinkan tegangan tinggi yang terjadi secara terus menerus di pertemuan tidak mampu dibendung sehingga menyebabkan deformasi arah bawah meningkat dan retak melintang terjadi dan akan semakin lebar seiring berjalannya waktu. Menurut SNI 2847:2019, perlu adanya tambahan penyaluran berupa sengkang kait yang membungkus penulangan longitudinal di bagian *joint* seperti pertemuan balok P1 dan P2 sejarak  $\leq 3 d_b$ .



Gambar 1. (a) Detail Tulangan Balok B2 dan (b) Sengkang Ikat Tegak Lurus Sepanjang  $l_{dh}$  (SNI 2847:2019)

### 3.3. Desain dan Pelaksanaan *Retrofitting*

#### 1) Permodelan Struktur.

Metode analisis garis leleh dari pelat yakni metode keseimbangan dan metode virtual. Didalam kedua metode, suatu pola garis luluh pertama-tama harus dimisalkan sehingga dihasilkan suatu mekanisme runtuh. Untuk mekanisme ini, pergerakan benda kaku dari segmen-segmen pelat dimungkinkan oleh putaran sepanjang garis luluh. Boleh Jadi, ada lebih dari satu pola garis luluh yang mungkin terjadi, yakni lokasi garis luluh dan arah momen yang terjadi di tengah bentang serta dapat pula pola garis luluh yang memotong tepi bebas tidak tegak lurus (Yazid M dkk, 1994).

Analisa perhitungan difokuskan pada lebar sayap efektif pada pelat lantai untuk balok sesuai ketentuan dalam standar SNI 2847: 2019. Pada lebar efektif inilah kemampuan batas maksimum balok memikul pelat lantai.

Tabel 8. Batasan Dimensi Lebar Sayap Efektif Untuk Balok-T (SNI 2847:2019)

Lokasi sayap	Lebar sayap efektif, di luar penampang balok	
Kedua sisi balok	Sekurangnya:	$8h$
		$s_w/2$
		$l_n/8$
Satu sisi balok	Sekurangnya:	$6h$
		$s_w/2$
		$l_n/12$

Data primer dan data sekunder yang didapatkan serta hasil uji parameter kerusakan, selanjutnya diolah kedalam permodelan struktur. Beban yang bekerja yakni berat sendiri struktur lantai elv +4.400 (Beban Mati) dan beban hidup acuan SNI 1727:2020. Guna menjamin permodelan mendekati kondisi aktual, maka perlu dilakukan analisa elemen hingga SAP 2000 dan analisa teoritis.

#### a) Analisa SAP 2000.

Hasil input data lalu di *running* sehingga memunculkan nilai lendutan. Pada titik kritis persilangan balok P1 dan P2, didapatkan perbandingan nilai lendutan sebagai berikut:

(1) Persilangan balok ke-1 (P1), memiliki selisih nilai lendutan 0,06 mm, yakni:

(a) Lendutan *Existing* = 34,00 mm.

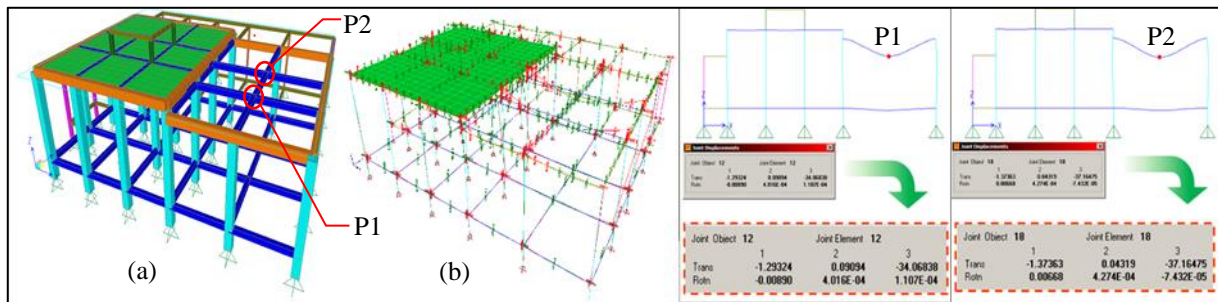
(b) Lendutan Joint 12 = 34,06 mm.

(2) Persilangan balok ke-2 (P2), memiliki selisih nilai lendutan 0,16 mm, yakni:

(a) Lendutan *Existing* = 37,00 mm.

(b) Lendutan Joint 18 = 37,16 mm.

Kedua nilai lendutan, antara versi SAP 2000 dan lendutan *existing* memiliki selisih nilai lendutan yang tidak terlampaui jauh. Hal ini berarti, permodelan struktur versi SAP 2000 telah mendekati kondisi struktur bangunan yang sebenarnya di lapangan.



Gambar 2. (a) Permodelan Struktur dan (b) Distribusi Momen Bangunan Uji pada SAP 2000

#### b) Analisa Teoritis.

Pada Setyawanto (2015), disebutkan bahwa penampang tak persegi yang paling umum adalah balok “T” dan “L” berflens. Prinsip-prinsip yang sama dipergunakan untuk perhitungan defleksi penampang-penampang persegi dapat diterapkan pada penampang tak persegi. Kontribusi gaya penahan tekan dapat diperoleh menggunakan luasan beton yang sesuai.

Persamaan *Barnson*, terbukti dapat diterapkan pada sebagian besar kasus-kasus balok bertulang dan prategang dan secara universal diadopsi untuk perhitungan-perhitungan defleksi, dengan menetapkan momen inersia efektif ( $I_e$ ) dalam perhitungan lendutan, kemudian pada komponen perhitungan tertentu digunakan acuan dalam standarisasi SNI 2487:2019 dan SNI 1727:2020.

Sumbu netral  $c$  dihitung dari kesetimbangan gaya horizontal penampang balok T, sehingga  $c$  dapat dicari menggunakan rumus abc (rumus persamaan kuadrat) yakni:

$$c = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

Setelah didapatkan Inersia penampang retak,  $I_{cr}$ , dan Inersia penampang bruto,  $I_g$ , selanjutnya Momen penampang retak,  $M_{cr}$ , dihitung menggunakan rumus:

$$M_{cr} = \frac{I_g \times f_r}{y_t} \quad (2)$$

P terpusat L/2 bentang dan beban merata L bentang, maka Momen aktual pasca retak,  $M_a$ , adalah:

$$M_a = \frac{P \times Ln}{4} + \frac{q \times Ln^2}{8} \quad (3)$$

Perhitungan Inersia efektif,  $I_e$ , dihitung dengan cara:

$$I_e = \left( \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g \right) + \left( \left( 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \times I_{cr} \right) \quad (4)$$

Sehingga lendutan pada L/2, dimana P terpusat pada L/2 dan beban merata sepanjang L balok adalah:

$$\Delta = \frac{P \times Ln^3}{48 \times E_c \times I_e} + \frac{5 \times q \times Ln^4}{384 \times E_c \times I_e} \quad (5)$$

Hasil perhitungan lendutan pada titik kritis P1 (balok EG4) dan P2 (balok EG3) disajikan pada Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan.

Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan

Lokasi Lendutan	M <sub>lap</sub> Nmm	I <sub>cr</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>g</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>e</sub> mm <sup>4</sup>	Δ <sub>Teoritis</sub> ΔP <sub>t</sub> (mm)	Δ <sub>SAP</sub> ΔP <sub>s</sub> (mm)	Δ <sub>Lap.</sub> mm
L <sub>EG3/2</sub> (P2)	78203171,7	300104178,3	996771428,6	305162870,7	39,54 (6,8%)	37,16 (0,4%)	37,000
L <sub>EG4/2</sub> (P1)	71894856,1	318154549,5	957723012,6	323554567,9	33,37 (1,8%)	34,06 (0,2%)	34,000

Ditinjau persentase hasil lendutan pada Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan, di mana lendutan hasil analisis SAP 2000 memiliki persentase perbedaan lebih kecil dibandingkan hasil analisis Teoritis mengacu pada lendutan *existing* di lapangan. Maka hasil permodelan struktur SAP 2000 selanjutnya digunakan sebagai dasar desain *retrofit* metode FRP tipe *StrongGlass* E450.

## 2) Desain *Retrofit*.

### a) Kuat Geser.

Pada Tabel 10 dapat dijelaskan bahwa lembaran FRP tipe *StrongGlass* E450 berjumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang balok uji EG4, EG3 dan F25 memenuhi persyaratan kuat geser nominal melebihi kuat geser yang dibutuhkan. Pemenuhan kuat geser yang dicapai, terindikasi dari besaran nilai 75% Kuat Geser nominal ( $\Phi V_n$ ) dari ketiga balok, dan seluruhnya terbukti mampu melebihi Kuat Geser ultimit ( $V_u$ ) baik di tumpuan ( $V_{u\_tumpuan}$ ) maupun di tengah bentang ( $V_{u\_lap}$ ). Masih tersimpannya kekuatan sebesar 25%, berarti aksi komposit ketiga balok memiliki kekuatan tambahan dalam menahan gaya geser diluar prediksi serta menekan kemungkinan terjadinya kegagalan geser. Hal tersebut atas pertimbangan kerusakan retak dan lendutan yang telah melampaui ijin.

Analisis perhitungan kontribusi FRP terhadap Kuat Geser menggunakan rumus dalam ACI-440.2R-08, faktor reduksi dalam SNI 2847: 2019 serta elemen penting lembaran FRP berdasarkan karakteristik *StrongGlass* E450 dalam *Estrong Technical Data Sheet* 2022. Kuat Geser harus memenuhi ketentuan:

$$\Phi V_n \geq V_u \quad (6)$$

$$\Phi V_n = \Phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (7)$$

Tabel 10. Rekapitulasi Desain Kuat Geser Balok Uji Penguatan FRP

Balok	Ln (mm)	n (lapis)	w <sub>f</sub> (mm)	V <sub>f</sub> N	V <sub>c</sub> N	V <sub>s</sub> N	ΦV <sub>n</sub> N	V <sub>u_lap</sub> N	V <sub>u_tumpuan</sub> N	Ket. ΦV <sub>n</sub> > V <sub>u</sub>
EG4	6000	1	200	3768,1	33054,9	10296,0	34915,3	11350,638	-31216,248	Memenuhi
EG3	6000	1	200	3768,1	33054,9	10296,0	34915,3	12559,231	-33846,839	Memenuhi
F25	9000	1	200	2512,1	33054,9	10296,0	34114,6	14303,665	3886,016	Memenuhi



b) Kuat Lentur.

Pada Tabel 11. Rekapitulasi Desain Kuat Lentur Balok Uji Perkuatan FRP, lembaran FRP tipe *StrongGlass* E450 dengan jumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang balok uji EG4, EG3 dan F25 memenuhi persyaratan kuat lentur nominal melebihi kuat lentur yang dibutuhkan. Pencapaian kekuatan terlihat dari 90% Kuat Lentur nominal ( $\Phi M_n$ ) dari ketiga balok, secara analisis terbukti mampu melebihi Kuat Lentur ultimit ( $M_u$ ) maksimal di tengah bentang ( $M_u_{lap}$ ). Ketiga balok lapis FRP tipe *StrongGlass* E450, melalui aksi komposit, masih menyimpan kekuatan sebesar 10%, sehingga balok perkuatan diharapkan berperilaku daktail maksimal menghindari keruntuhan lentur.

Analisis perhitungan kontribusi FRP terhadap Kuat Lentur menggunakan rumus dalam ACI-440.2R-08, faktor reduksi dalam SNI 2847: 2019 serta elemen penting lembaran FRP berdasarkan karakteristik *StrongGlass* E450 dalam *Estrong Technical Data Sheet* 2022. Kuat Lentur harus memenuhi ketentuan:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (8)$$

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_c}{2} \right) \quad (9)$$

Tabel 11. Rekapitulasi Desain Kuat Lentur Balok Uji Pekuatan FRP

Balok	Ln (mm)	n (lapis)	w <sub>r</sub> (mm)	$\Phi M_n$ Nmm	Mu <sub>lap</sub> Nmm	Ket. $\Phi M_n > M_u_{lap}$
EG4	6000	1	200	73778386,74	65549935,07	Memenuhi
EG3	6000	1	200	73778386,74	72529559,50	Memenuhi
F25	9000	1	200	73778386,74	34099792,27	Memenuhi

c) Lendutan.

Lendutan balok retrofit FRP tipe *StrongGlass* E450 pada Tabel 12. Rekapitulasi Desain Lendutan Pada Balok Uji Pekuatan FRP, secara analisis memenuhi persyaratan terhadap lendutan ijin. Nilai lendutan pada ketiga balok ( $\Sigma \Delta$ ), hasil gabungan nilai lendutan akibat beban (D dan L) dan momen ultimit, tidak melampaui lendutan ijin ( $\Delta$  ijin). Penambahan FRP tipe *StrongGlass* E450 sebagai lapis perkuatan turut meningkatkan kekakuan balok, akibat meningkatnya inersia disamping kuat geser dan kuat lentur yang bekerja secara komposit pada balok.

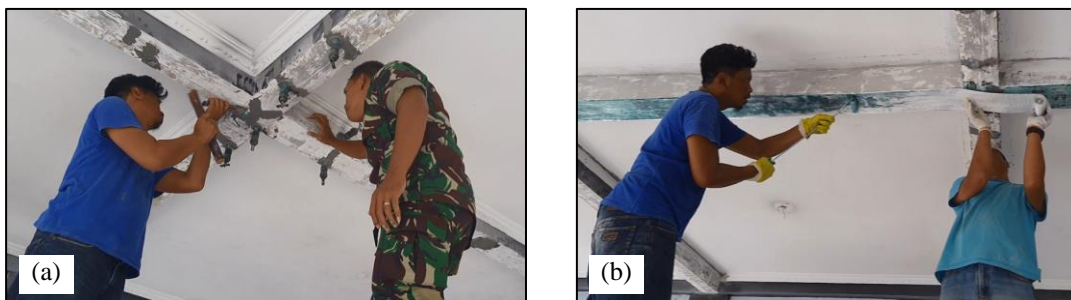
Tabel 12. Rekapitulasi Desain Lendutan pada Balok Uji Pekuatan FRP

Balok	L (mm)	n (lapis)	w <sub>r</sub> (mm)	$\Sigma \Delta$ Balok (mm)	$\Delta$ ijin (mm)	Ket. $\Sigma \Delta$ Balok < $\Delta$ ijin
EG4	6000	1	200	5,426	16,042	Memenuhi
EG3	6000	1	200	5,976	16,042	Memenuhi
F25	9000	1	200	10,519	24,375	Memenuhi

3) Pelaksanaan *Retrofit*.

a) Injeksi Beton.

Metode perbaikan pada beton dapat dilakukan melalui injeksi bahan *Epoxy* yang berkekuatan tinggi untuk menutupi retak pada muka beton, juga digunakan untuk injeksi pada *nozzle*, sehingga dapat bertahan dibawah tekanan pompa injeksi *epoxy* (Puspita dkk., 2018). Bahan injeksi *StrongGrout EP10* yang memiliki viscositas rendah untuk mengisi bagian beton yang terpisah, bersifat mengeras (tidak getas), serta bahan *Estobond EC* (*base* dan *hard*) untuk mencegah kebocoran sealer. Mekanisme aplikasi mengacu pada *Estrong Technical Data Sheet* 2022 mengikuti standar ASTM D965 dan ASTM D638.



Gambar 3. (a) Proses Injeksi, dan (b) Proses Pemasangan FRP *StrongGlass* E450.

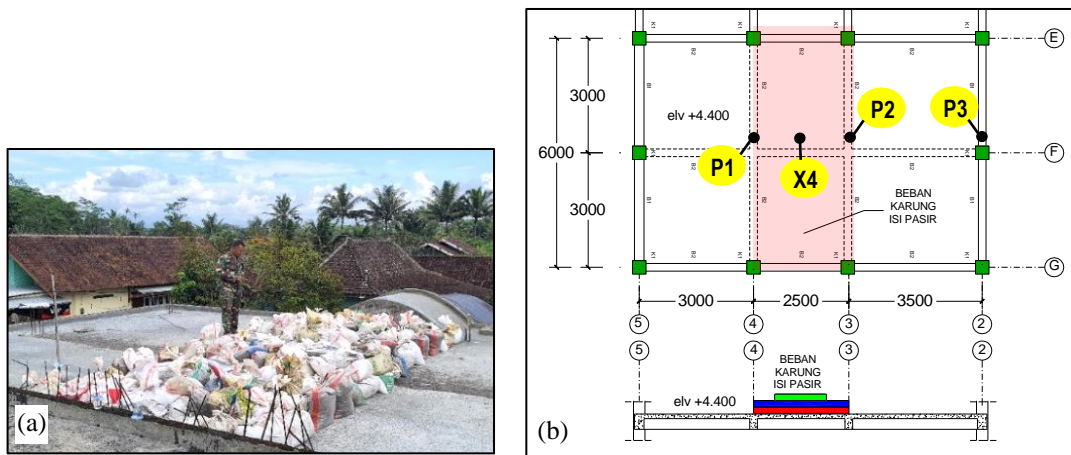
b) Pemasangan FRP.

Pelaksanaan pemasangan FRP tipe *StrongGlass E450*, dengan bahan perekat *EstoWrap Resin Hardener* mengacu pada *Estrong Technical Data Sheet 2022*. Bahan perekat diaplikasikan sebanyak 3 lapis, di mana tiap lapisan sebanyak 0,6 Kg/m<sup>2</sup> (setebal ± 2 mm pada muka beton) disebarikan secara paralel searah kerja FRP menggunakan *roll*. Waktu tunggu *fully cured* adalah 7 hari, sebagai batas minimal untuk dilakukan pengujian pembebanan (*Loading Test*) pasca *retrofitting*.

3.4. Perilaku Pasca *Retrofitting*

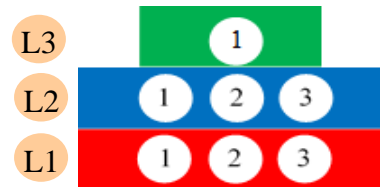
1) Uji Pembebanan (*Loading Test*).

Mekanisme pembebanan untuk pengujian lendutan sesuai tahapan pengujian dalam SNI 03-6760-2002. Pada SNI 1727: 2020, data yang diperoleh pada bangunan aktual menunjukkan bahwa jarang ada suatu lantai yang dibebani sampai lebih dari 80% dari beban hidup rata-rata yang dihitung. Beban uji adalah beban hidup sebesar 3,830 kN/m<sup>2</sup>, maka digunakan desain 70% (280 Kg/m<sup>2</sup>), diletakkan pada bidang lantai seluas 15 m<sup>2</sup> sehingga dibutuhkan 210 karung isi pasir (berat per karung 20 Kg) atau senilai 4200 Kg yang disusun sebagai berikut:



Gambar 4. (a) Pemeriksaan Beban Karung Isi Pasir, dan (b) Posisi Area Pembebanan pada Muka Lantai Elv +4.400.

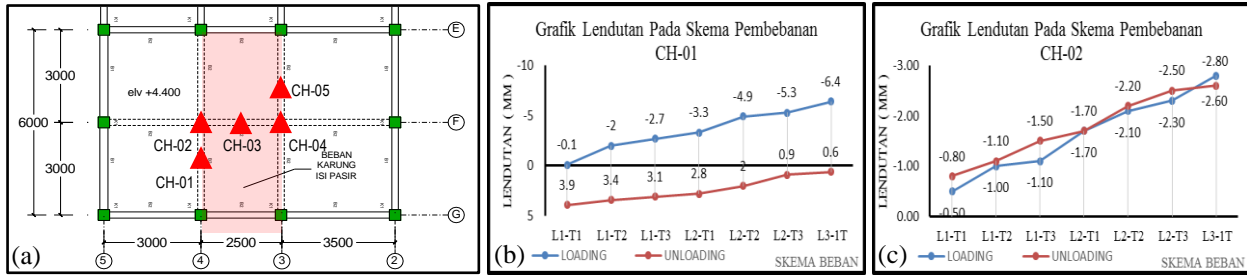
- a) Beban 94 karung (1880 Kg) pada lapisan 1 (L1).
  - (1) Tahap 1 = 31 karung.
  - (2) Tahap 2 = 31 karung.
  - (3) Tahap 3 = 32 karung.
- b) Beban 94 karung (1880 Kg) pada lapisan 2 (L2).
  - (1) Tahap 1 = 31 karung.
  - (2) Tahap 2 = 31 karung.
  - (3) Tahap 3 = 32 karung.
- c) Beban 22 karung (440 Kg) pada lapisan 3 (L3).
  - 1 tahap = 22 karung.



2) Uji Lendutan dengan LVDT.

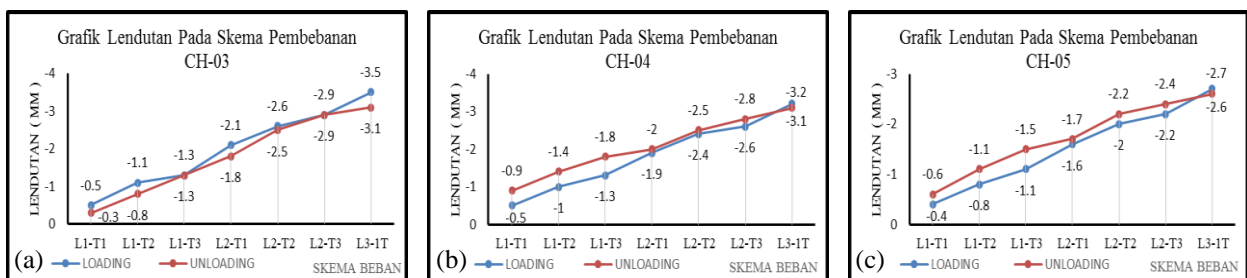
Pelaksanaan uji lendutan dengan LVDT mengacu pada SNI 03-6760-2002 dan ACI 437R-03, di mana jumlah LVDT sebanyak 5 unit terpasang memenuhi ketentuan yang disyaratkan. Lendutan max. CH-02 terbaca -2,80 mm (ke bawah), saat sebelum *Loading Test* pada titik CH-02 total lendutan terukur -28,00 mm, maka akumulasi lendutan CH-02 menjadi -30,80 mm (Titik “0” pada P3). Lendutan CH-02 pada kondisi *existing* (sebelum dilapisi FRP) sebesar -34,00 mm, maka terdapat beda elevasi sebesar +3,20 mm (ke atas). Secara keseluruhan akumulasi lendutan pada CH-02 pasca *Loading Test* (-30,80 mm) masih melampaui nilai lendutan ijin -24,375 mm. Pemberian injeksi pada keretakan balok, dimungkinkan mempengaruhi peningkatan kekakuan balok.





Gambar 5. (a) Posisi LVDT pada Balok Uji Lantai Elv +4.400, serta Grafik Lendutan pada Skema Pembebanan (b) CH-01, dan (c) CH-02.

Pada CH-03, lendutan tertinggi yakni -3,50 mm (arah ke bawah). Apabila ditinjau lendutan titik X4 sebelum start uji beban (-31,00 mm), maka pasca uji pembebanan lendutan titik X4 menjadi senilai -34,50 mm, atau masih melampaui nilai lendutan ijin 24,375 mm. Walaupun lendutan telah melewati batas ijin, balok retrofit lapis FRP terbukti mampu bertahan dan melayani peningkatan beban aksial uji (sebesar 25,98 %) tanpa adanya kerusakan. Defleksi yang ada memperlihatkan kemampuan daktil dari aksi komposit pada beton retrofit.



Gambar 6. Grafik Lendutan pada Skema Pembebanan (a) CH-03, (b) CH-04, dan (c) CH-05.

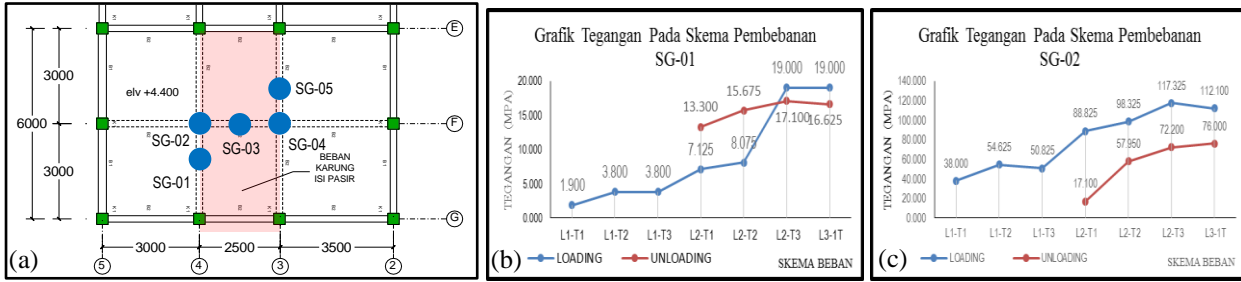
Kemudian CH-04, lendutan max. terbaca -3,20 mm (arah ke bawah), sementara saat sebelum *Loading Test* lendutan pada titik CH-04 terukur -31,00 mm, maka total lendutan CH-04 menjadi -34,20 mm. Lendutan CH-04 pada kondisi *existing* (sebelum dilapisi FRP) sebesar -37,00 mm, maka terdapat beda elevasi sebesar +2,80 mm (ke atas), pada kondisi beban naik sebesar 25,98 %. Secara keseluruhan akumulasi lendutan pada CH-04 pasca *Loading Test* (-34,20 mm) masih melampaui nilai lendutan ijin sebesar -24,375 mm. Pemberian injeksi pada keretakan balok, dimungkinkan mempengaruhi peningkatan kekakuan balok.

Lendutan CH-05 tertinggi terbaca -2,70 mm (arah ke bawah) dan masih berada dibawah nilai lendutan desain balok EG3 lapis FRP yakni -5,976 mm. Titik CH-05 berjarak 80 cm dari titik CH-04 maka perilaku balok *retrofit* FRP pada titik CH-05 tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Meskipun prosedur kalibrasi 5 unit LVDT pembacaan "0" pada *Data Logger* dan prosedur *Loading - Unloading* telah dilaksanakan dengan tahapan yang benar melalui pengawasan secara langsung dari aplikator, namun posisi 5 bentuk kurva hasil pembacaan alat terekam tidak sama. Hal ini dimungkinkan akibat perlemahan area pertemuan dua balok pada CH-02 dan CH-04 yang memerlukan waktu kembali ke posisi "0" balok beton lebih lama dibandingkan posisi tengah bentang CH-03, sehingga nilai lendutan cenderung lebih besar.

### 3) Uji Regangan dengan *Strain Gauge*.

Pada titik uji SG-01 sampai dengan SG-05 secara umum memiliki kondisi yang hampir sama. Hasil regangan melalui modulus elastisitas FRP *StrongGlass* E450 dikonversi ke tegangan. Berdasarkan grafik masing-masing bacaan alat dapat terlihat bahwa pada skema dua titik beban (L2-T3 dan L3-1T) terdapat perbedaan nilai Tegangan yang tidak begitu jauh, baik pada saat proses *Loading* dan *Unloading*. Hal ini membuktikan bahwa aktivitas Tegangan pada beban mendekati puncak dan beban meninggalkan puncak berada di daerah elastis (menyerupai garis datar).

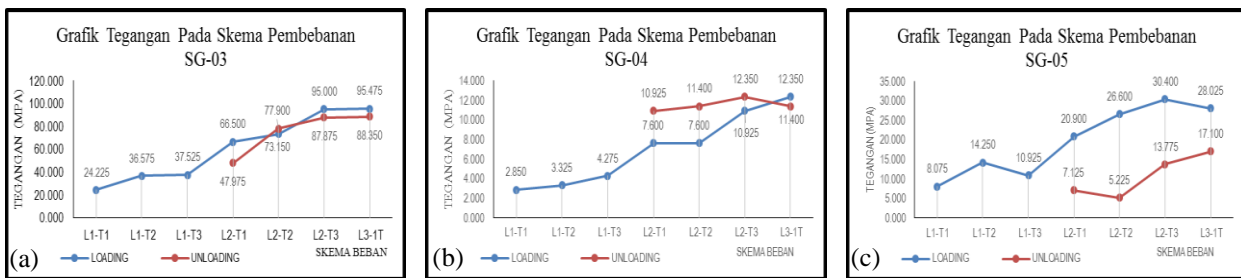
Pada kondisi ini mengindikasikan tegangan tarik mendekati maksimum dan mulai memperlihatkan batas kekuatan. Penambahan FRP pada balok untuk mendapatkan perimbangan kondisi regangan dan tegangan. Kondisi retak awal, mengindikasikan tulangan tarik telah mencapai tegangan leleh atau regangan min. 0,004 tercapai, berperilaku daktil pada kekakuan yang kecil ( $h < h_{min}$ ). Akibat penambahan FRP, regangan tertinggi terjadi di daerah tarik pada titik SG-02 sebesar 0,00154 sehingga menurut SNI 2847: 2019, memungkinkan balok berperilaku getas lentur pada kondisi beban max. 4200 kg (beban naik 25,98 %).



Gambar 7. (a) Posisi *Strain Gauge* pada Balok Uji Lantai Elv +4.400, serta Grafik Tegangan pada Skema Pembebanan (b) SG-01, dan (c) SG-02.

Tegangan tarik tertinggi dicapai pada SG-02 (Pertemuan balok P1) sebesar 117,325 MPa (naik 23,879 % dari  $f_u$  491,32 MPa) diikuti CH-03 (Pertengahan bentang balok lantai uji beban) sebesar 95,475 MPa dan masih dibawah tegangan komposit FRP sebesar 580,000 MPa (*Strong Technical Data Sheet*, 2022). Regangan puncak pada SG-02 sebesar 0,00154 lebih rendah dari regangan ijin max. 0,003 (SNI 2847: 2019) maupun regangan komposit *StrongGlass* E450 sebesar 0,005, maka hal ini dapat mengindikasikan bahwa balok belum mencapai keseimbangan regangan atau keadaan luluh.

Meninjau kondisi pra *retrofit* dimana balok mengalami lendutan disertai retak pada muka beton (kondisi daktail), maka pada pasca *retrofit* penerapan FRP tipe *StrongGlass E450* terbukti meningkatkan kapasitas kekuatan balok dalam memikul beban, dimana balok beton bertulang masih menyediakan kekuatan pada beban layan tambahan sebesar 4200 kg.



Gambar 8. Grafik Tegangan pada Skema Pembebanan (a) SG-03, (b) SG-04, dan (c) SG-05.

## Kesimpulan

- Kondisi balok nonprategang *existing* 200/270 memiliki  $h_{lap} < h_{min}$  (286 mm) dengan mutu beton terkecil *Hammer Test* K.408 kg/cm<sup>2</sup> melebihi mutu desain K.275 Kg/cm<sup>2</sup>. Indikator mutu beton yang ada belum mencerminkan perilaku aktual balok *existing*, dimana balok berperilaku daktail pada kondisi retak > 0,3 mm (retak ijin max) dan lendutan nyata  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm) melampaui ijin (24,75 mm).
- Kondisi BjTP 12 terpasang diluar batas bawah  $\pm 4$ mm berakibat luasan tarik baja tulangan berkurang, idealnya ikut mempengaruhi kapasitas kuat tariknya. Hasil uji tarik nilai  $f_y$  rata-rata 348,47 MPa >  $f_y$  min 280 MPa dan  $f_u$  rata-rata 491,32 MPa >  $f_u$  min 350 MPa, memperlihatkan tulangan masih mampu memberikan kontribusi daktail pada balok yang retak dan melendut tanpa adanya keruntuhan.
- Lendutan hasil permodelan *Software SAP 2000* yakni  $\Delta P_{s1}$  (34,06 mm) dan  $\Delta P_{s2}$  (37,16 mm), lebih mendekati nilai lendutan *existing*  $\Delta P1$  (34,0 mm) dan  $\Delta P2$  (37,0 mm) dibanding hasil analisis Teoritis. Prosentase perbedaan berturut-turut sebesar 0,2% dan 0,4%. Maka permodelan SAP 2000 digunakan sebagai dasar desain balok *retrofit*.
- Desain FRP tipe *StrongGlass E450* dengan jumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang 3 balok uji memenuhi syarat kuat lentur ( $\phi Mn \geq Mu$ ) dan kuat geser ( $\phi Vn \geq Vu$ ) dengan lendutan tertinggi 10,519 mm pada Balok F25 Ln 9.000 mm, tidak melampaui lendutan ijin 24,375 mm.
- Perilaku balok *retrofit* lapis FRP tipe *StrongGlass E450* pasca uji pembebanan dengan beban pasir max. 4200 Kg (beban meningkat sebesar 25,98 %) membuktikan terjadi peningkatan kekuatan dari hasil uji lendutan dan uji regangan. Peningkatan kuat tarik balok *retrofit* sebesar 117,325 MPa (naik 23,879 %), memberikan dampak regangan max. sebesar 0,00154 dan masih lebih rendah dari regangan ijin maupun regangan komposit, sehingga mengindikasikan balok belum mencapai keseimbangan regangan atau keadaan luluh. Pasca injeksi pada balok yang retak sebelum pemasangan FRP *StrongGlass E450*, turut mempengaruhi nilai defleksi serta kekakuan balok, dimana total lendutan pra *retrofit* (*existing*)  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm), menjadi lendutan pasca *retrofit*  $\Delta P1$  (-30,8 mm) dan  $\Delta P2$  (-34,2 mm), namun secara keseluruhan masih melampaui lendutan ijin 24,375 mm.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas organisasi A atas dukungan finansialnya pada penelitian ini dan organisasi B atau dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada ahli C atas dikusinya yang bermanfaat.

## Daftar Notasi

- $c$  = Jarak dari serat tekan terjauh ke sumbu netral, mm.  
 $I_{cr}$  = Inersia penampang retak, mm<sup>4</sup>  
 $I_e$  = Momen inersia efektif, mm<sup>4</sup>  
 $I_g$  = Inersia penampang bruto, mm<sup>4</sup>  
 $M_a$  = Momen aktual pasca retak, N-mm  
 $M_{cr}$  = Momen penampang retak, N-mm  
 $\Delta$  = Perbedaan antara defleksi awal dan akhir, mm

## Daftar Pustaka

- ACI Committee 318. (2019). *ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 228. (2013). *ACI 228.2R-13 Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 440. (2008). *ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 437. (2003). *ACI 437R-03 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 224. (2001). *ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Apriyani, W. (2016). Aplikasi Non Destructive Test Pada Investigasi Keandalan Struktur Beton (Studi Kasus: Kolom Basement – K4 Pada Bangunan Stadion Utama Riau). *Jurnal Teknik Sipil Siklus*: Vol. 2 No. 2, pp. 95-103.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727: 2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional: ICS 93.020.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847: 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional: ICS 91.080.40.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 2052: 2017 Baja Tulangan Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8389: 2017 Cara Uji Tarik Logam*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C597: 2012 Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton (ASTM C597-02, IDT)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6760-2002 Pengujian Pembebanan Lantai Beton Bertulang Bangunan Bertingkat Dengan Beban Air*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Estrong. (2022). *StrongGlass E450 High Strength Glass Fiber Sheet for Concrete Structural Strengthening System. Technical Data Sheet*. PT. Estrong Nusantara Mandiri.
- Estrong. (2022). *StrongWrap Primer E450 and StrongWrap Encap Resin. Technical Data Sheet*. PT. Estrong Nusantara Mandiri.
- Luastika, G.N., Lingga, A.A., Lestyowati, Y. (2019). Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer*. FT-Untan. pp: 1-7.
- Nalarita, K., Isneini, M., Alami, F. (2019). Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Menggunakan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan WM (*Wiremesh*). JRSD, Edisi Juni 2019, Vol.7, No. 2. pp: 234-246.
- Parannuan, K. (2017). Kapasitas Lentur Balok Beton Perkuatan GFRP Pasca Tulangan Leleh. Universitas Hassanuddin: Makasar: pp. 1-28.
- Parmo, Taufikurrahman. (2014). Perbaikan Kekuatan dan Daktilitas Balok Beton Bertulang Menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Strips. *Jurnal Ilmu-ilmu Teknik-Sistem*, Vol. 10, No. 3. pp: 63-71.
- Pranata, D.R., Witjaksana, B., Tjendani, H.T. (2022). Analisis Perkuatan Struktur Beton dengan Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp)*, dan *Glass Fiber Reinforced Polymer (Gfrp)* Terhadap Biaya. *Prosiding Senakama*, Vol. 1. pp: 35-45.
- Puspita, F.F., Aulia, T.B., Afifuddin, M. (2018). Analisis Retak Lentur Pada Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi yang Diperbaiki dengan Injeksi Epoxy. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala, Hidrologi, Lingkungan dan Struktur*. Vol. 1 No. 4. pp: 831-844.
- Ridwan, A.R., Sultan, M.A., Gaus, A. (2022). Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet Pada Balok Beton Bertulang dengan Tulangan Korosi. *Teras Jurnal*, Vol. 12 No. 1. pp: 103-116.
- Setyawanto, R.A. (2015). Pengaruh Letak Sambungan Beton dan Tulangan Longitudinal Terhadap Balok T Pada Jarak Seperempat Bentang. *Institut Teknologi Nasional Malang*. pp: 35-78.

- Tavio, Firmansyah, M.F., Rasyid, H.A. (2022). Kajian Perkuatan Struktur Rumah Sakit RKZ Surabaya Menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Sheets*. Jurnal Teknik ITS, Vol. 11, No. 3. pp: 138-145.
- Yusfar. (2018). Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* Pada Struktur Balok Beton Bertulang, Teknik Sipil Universitas Islam Riau, Tesis. pp: 1-57.

## Simulasi Perpindahan Panas pada Pipa *Secondary Super Heater* (SSH) PLTU 600 MW dengan CFD

Gugum Gumilar<sup>1</sup> dan Tarsisius Kristiyadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

[go3m\\_gumilar@yahoo.co.id](mailto:go3m_gumilar@yahoo.co.id), [kristiyadi@itenas.ac.id](mailto:kristiyadi@itenas.ac.id)

### Abstrak

*Boiler* merupakan unit penting pada PLTU yang didalamnya terdapat *superheater* untuk memanaskan uap agar panas dan kekeringannya meningkat sehingga menjadi uap panas lanjut. Permasalahan terjadi pipa *secondary superheater* pecah karena mengalami panas berlebih akibat adanya deposit lapisan oksida didalamnya. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan perpindahan panas pada pipa SSH yang mengalami pecah. Dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* model pipa dibuat 3 model yaitu tanpa sumbatan, sumbatan di ujung, dan pipa dengan sumbatan di tengah. Simulasi dilakukan dalam *steady state*, data operasional *boiler* seperti parameter tekanan, temperatur, kecepatan aliran dan laju aliran massa. Hasil simulasi menampilkan profil warna yang berbeda-beda untuk temperatur, kecepatan aliran dan tekanan untuk uap di dalam pipa dan untuk *flue gas* di luar pipa. *Heat transfer rate* area *flue gas* lebih tinggi sekitar 800.000 kW, area uap di dalam pipa sekitar 80 kW, *mass flow rate* uap sebesar 0,046 kg/s sedangkan di area *flue gas* sebesar 0,130 kg/s. Kecepatan aliran uap rata-rata berkisar 1 m/s, maksimum 12 m/s pada model pipa dengan sumbatan, kecepatan aliran *flue gas* rata-rata berkisar 9 sampai 10 m/s. Temperatur uap rata-rata 600°C, dan 800°C hingga 900°C. Tekanan uap tidak mengalami perubahan yaitu sebesar 16.000.000 Pa dan tekanan *flue gas* 100.000 Pa.

Kata kunci: PLTU, *secondary superheater*, *computation fluid dynamics*, *heat transfer rate*

### Abstract

The boiler is an important unit in the PLTU in which there is a Superheater to heat the steam so that increase and becomes superheated steam. The problem is secondary superheater pipe bursts due to excessive heat due to the deposit of the oxide layer in it. This study aims to simulate heat transfer in SSH pipes. with Computational Fluid Dynamics, 3 models are made, without a blockage, blockage at the end, and blockage in the middle. The simulation in a steady state, boiler operational data ; pressure, temperature, velocity flow and mass flow rate. The results show different color profiles for temperature, flow velocity and pressure for the steam and for flue gas. Flue gas heat transfer rate is higher around 800,000 kW, and steam is around 80 kW, Steam mass flow rate is 0.046 kg/s while in the flue gas area it is 0.130 kg/s. The average steam flow rate is around 1 m/s, the maximum is 12 m/s in blocked pipe models, Flue gas flow rate is around 9 to 10 m/s. The average steam temperature is 600°C, and 800°C to 900°C. Steam pressure constant in 16,000,000 Pa and flue gas pressure is 100,000 Pa.

Keywords: PLTU, Secondary Super Heater, Computation Fluid Dynamics, Heat Transfer Rate

### 1. Pendahuluan

*Boiler* merupakan salah satu peralatan utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan pada pipa-pipa penguap (*evaporator tubes*) dengan sumber panas yang didapat dari proses pembakaran bahan bakar yang berasal dari batu bara di ruang bakar. Energi panas dari pembakaran yang dihasilkan kemudian dipindahkan ke fluida kerja berupa air untuk memproduksi uap tekanan tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin. Terdapat tiga proses perpindahan panas yang terjadi dalam *boiler*, yaitu radiasi di ruang bakar, konveksi di ruang *air heater*, dan kombinasi radiasi dan konveksi di *superheater* dan *eeheater* (M.J. Djokosetyardjo, 2003).

Proses perpindahan panas secara radiasi pada *boiler* terjadi pada area ruang bakar *boiler* dan tidak memerlukan media penghantar panas. Gas panas hasil pembakaran batubara dengan temperatur tinggi yang akan dibuang ke udara luar akan mengenai pipa *boiler* dan mengakibatkan pipa menjadi panas.

Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui media perantara yaitu dinding pipa *bolier* tetapi tanpa disertai perpindahan partikel-partikel media/pipa tersebut. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi di dalam pipa disertai dengan perpindahan media penghantar panasnya yaitu uap panas tersebut. *Superheater* adalah sebuah alat penukar panas yang kinerjanya sangat dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas konveksi dan konduksi yang terjadi didalamnya. Perpindahan panas konveksi sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan pola aliran fluida. Sedangkan perpindahan panas konduksi dipengaruhi oleh konduktifitas termal material/bahan pipa alat penukar panas itu sendiri.

#### Info Makalah:

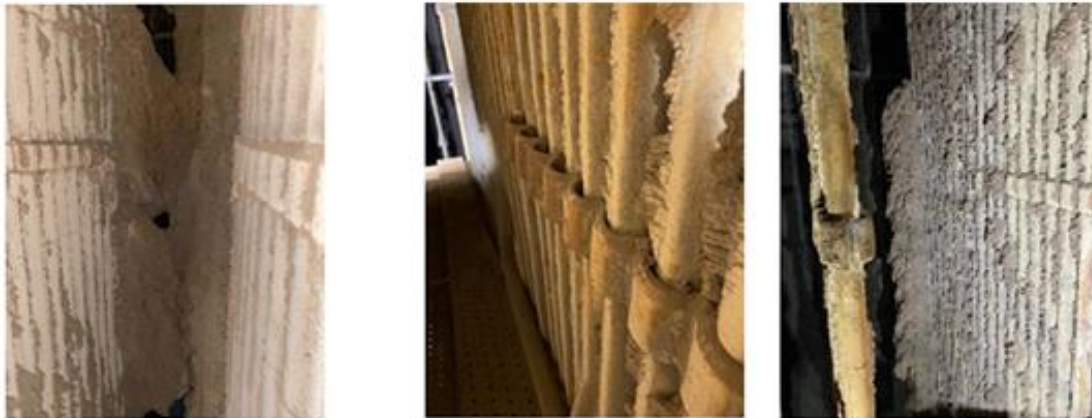
Dikirim : 03-24-23;  
Revisi 1 : 06-30-23;  
Revisi 2 : 07-19-23;  
Revisi 3 : 08-03-23;  
Diterima : 08-07-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 815-7177-874  
e-mail : [go3m\\_gumilar@yahoo.co.id](mailto:go3m_gumilar@yahoo.co.id)



Gambar 1 menunjukkan bagian *boiler* yaitu susunan pipa SSH yang secara visual di beberapa bagian sudah mengalami *aging*, *slag deposit* dan terdapat *oxide scale* pada bagian luarnya.



Gambar 1. Pipa SSH Tampak Luar yang Terdapat Deposit.

Kondisi ini menyebabkan kinerja kerja *boiler* akan menurun bila dilihat dari usia pakainya. Hal ini disebabkan adanya pengaruh masa pakai dari mesin, pengoperasian, pemeliharaan *boiler*, dan pengaruh banyaknya kerugian panas yang terjadi. *Boiler* yang mengalami penurunan kinerja tentu memerlukan biaya pemeliharaan yang cukup banyak. Hal tersebut bisa terjadi karena adanya reparasi dan penggantian komponen pada pipa *boiler* salah satunya adalah pipa SSH.

Pipa SSH mengalami *short term overheat*, disebabkan karena terdapat penumpukan deposit lapisan oksida di bagian dalam di area *elbow* pipa SSH sehingga terjadi perubahan kecepatan aliran uap dan berakibat pada massa uap yang mengalir di area pipa tersebut menjadi lebih sedikit dan tidak mencukupi untuk menyerap semua panas dari *flue gas* yang seharusnya diserap oleh uap panas di dalam pipa tersebut. Meskipun pipa SSH sudah diganti dengan pipa baru tapi kegagalan masih terjadi karena terganggunya aliran uap panas akibat adanya serbuk deposit yang menumpuk di daerah *elbow* pipa. Masuknya serbuk deposit oksida ke dalam pipa baru tersebut terjadi pada saat pembangkit dilakukan *start up* di mana pada saat kondisi *start up*, aliran massa uap yang mengalir di pipa baru tersebut lebih banyak karena laluan masih bebas sumbatan dibandingkan dengan pipa lainnya yang sudah lama digunakan.

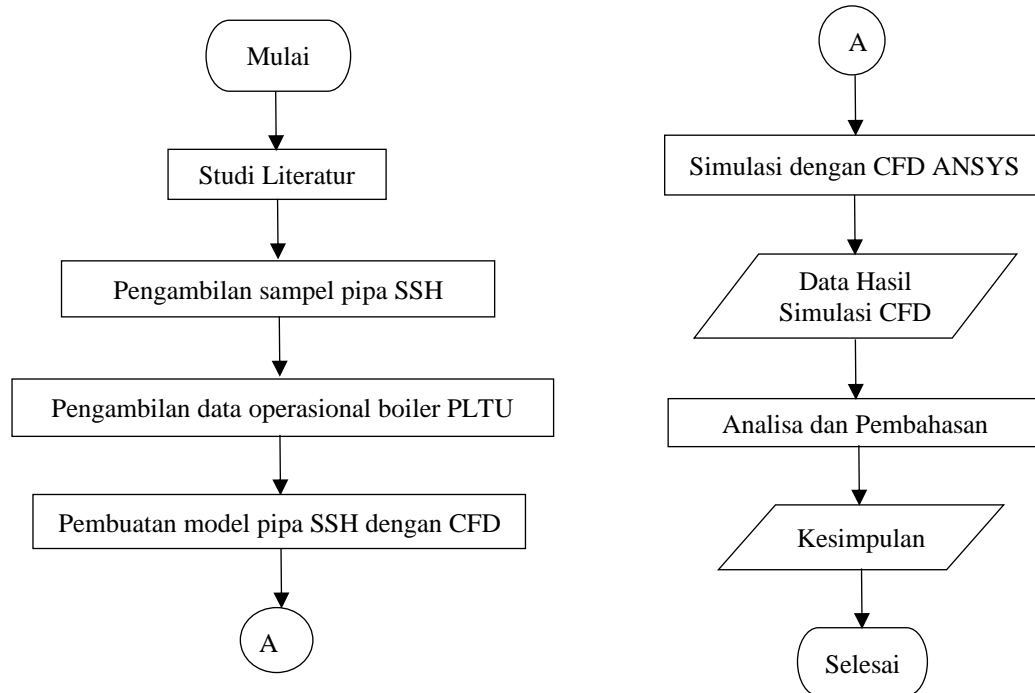
*Superheater* merupakan salah satu alat pada *boiler* yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). Komponen *superheater* mempunyai fungsi yang sangat penting, karena apabila komponen mengalami gangguan maka kualitas uap panas yang dihasilkan menjadi lebih rendah dan menyebabkan daya (*output power*) yang dihasilkan turbin menjadi lebih rendah (Viki Wahyu Endriyana dkk, 2013). Komponen *boiler* yang sangat berisiko mengalami panas berlebih adalah pada pipa penukar panas di *superheater*, *superheater* mengalami temperatur operasi yang cukup tinggi (Ryno Laubscher dan Pieter Rousseau, 2019). Degradasi akibat panas yang berlebih akan bertambah seiring dengan naiknya temperatur, tegangan dan juga waktu (Dillon dkk, 2011)

Malfin, (2018) telah melakukan penelitian bahwa setiap kenaikan bilangan *Reynold* akan berdampak pada nilai perpindahan panas. Banyaknya fluida yang masuk ke dalam suatu aliran per satuan waktu akan memiliki bilangan *Reynold* yang tinggi sehingga nilai performa perpindahan panas juga akan tinggi dibandingkan dengan fluida dengan bilangan *Reynold* yang kecil. Pipa SSH yang mengalami kegagalan seperti pecah dari bagian dalam ditandai adanya penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi sumuran, dengan temperatur dan tekanan yang tinggi ini menyebabkan pipa SSH menerima beban panas berlebih dan terjadi pecah (Lusiana dkk, 2019). Pemodelan dengan CFD dilakukan untuk menampilkan profil kecepatan aliran uap, temperatur dan tekanan di dalam area *superheater* (Mariusz Granda dkk, 2020). Dalam bidang keteknikan metode CFD (*Computational fluid Dynamics*) merupakan salah satu cara mudah untuk menyelesaikan suatu persamaan-persamaan yang berkaitan dengan dinamika fluida menggunakan komputer. CFD memiliki kelebihan untuk melakukan perhitungan dalam waktu yang singkat dan biaya yang cukup terjangkau dibandingkan dengan eksperimen, CFD juga dapat mengetahui fenomena aliran fluida (Rossi Cahyaningdias dan Ary Bachtiar Krishna Putra, 2019). Kajian mengenai analisa kegagalan material pada pipa SSH akibat terjadinya *short term overheat* sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan belum dilakukan kajian meliputi pemodelan pipa dengan CFD. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalan pipa sehingga terjadi pecah/sobek, yaitu dengan melihat hasil dari simulasi CFD pada model pipa SSH yang tanpa sumbatan aliran (bersih), dan pipa SSH dengan hambatan aliran di mana variasi posisi hambatan di ujung pipa dan di bagian tengah (horizontal). Sehingga bisa dilihat pengaruhnya terhadap nilai kecepatan aliran, temperatur dan tekanan baik di dalam pipa maupun di luar area pipa. Salah satu metode yang berkembang untuk menganalisis kondisi suatu aliran fluida dengan input yang tanpa batas mulai dari modifikasi geometri hingga ke kondisi operasionalnya (laju aliran massa, tekanan, temperatur, kecepatan

aliran bahkan material fluidanya) adalah dengan menggunakan CFD agar bisa dibandingkan profil warna dari kecepatan aliran, temperatur dan tekanan uap panas dan *flue gas* hasil simulasi dari ketiga model pipa SSH tersebut.

## 2. Metode

Metodologi penelitian merupakan suatu metode ilmiah dalam sebuah penelitian untuk mencapai tujuan analisa dalam penemuan atau pengembangan suatu pengetahuan. Dalam sebuah penelitian diperlukan sebuah rancangan metode penelitian yang mencakup tahapan-tahapan dalam pemecahan masalah. Metodologi penelitian diperlukan untuk mendapatkan hasil yang dikehendaki dan data yang valid. Alir penelitian dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian,

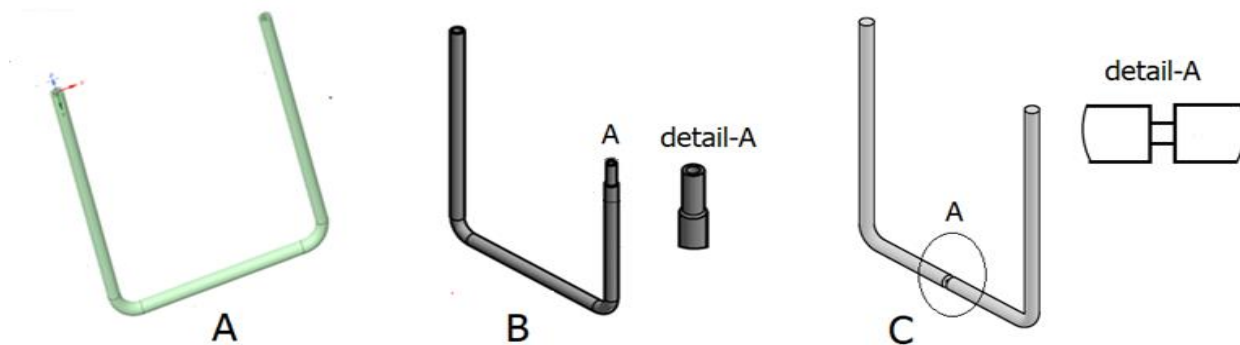
Gambar 2 menunjukkan diagram alir penelitian, dimulai dengan studi literatur dengan mengkaji dari sumber-sumber yang relevan dengan penelitian. Kemudian dengan menyiapkan sampel pipa SSH sebagai objek penelitian untuk dilakukan pengecekan visual, bentuk model, pengukuran dimensional, dan data penunjang lainnya yang diperlukan. Pengambilan data operasi *Boiler* merupakan data operasi seperti temperatur, tekanan, laju aliran massa, kecepatan aliran dan beberapa data lain yang diperlukan untuk simulasi model pipa SSH dengan CFD.

Setelah data terkumpul dilanjutkan dengan membuat model geometri pipa SSH. Dengan variasi 2 model pipa yaitu pipa tanpa hambatan aliran dan model pipa dengan hambatan aliran. Kemudian tahapan selanjutnya adalah proses input parameter dan tahapan simulasi (*running calculate*) dengan menggunakan CFD. Dari hasil simulasi diperoleh tampilan data numerik berupa *heat transfer rate* dan *mass flow rate* juga visualisasi kontur profil dari temperatur, tekanan juga kecepatan aliran untuk uap di dalam pipa dan *flue gas* di luar pipa SSH. Setelah itu dilakukan proses analisis data tahapan ini melakukan pengecekan ulang dan mengevaluasi kembali hasil simulasi apakah terdapat kesalahan atau tidak. Jika data sudah benar akan ditampilkan dalam bentuk tabel maupun bentuk grafik agar mempermudah menarik kesimpulan secara singkat dan jelas dari hasil penelitian yang dilakukan. Aplikasi Ansys R 2022 *student version* digunakan untuk menampilkan visualisasi aliran uap, meliputi kecepatan aliran, temperatur dan juga tekanan di pipa SSH.

### 2.1 Pre-Processing

Pada tahap *pre-processing* umumnya terdapat tiga tahapan yang harus diselesaikan adapun tiga tahap yaitu; Pertama pembuatan model/geometri pipa SSH, geometri merupakan domain yang berguna sebagai objek penelitian, di mana simulasi fluida dan solid akan terjadi sehingga dalam simulasi CFD bentuk geometri menjadi langkah pertama dalam simulasi. Kedua adalah penentuan domain geometri yang berupa model 3 dimensi dan kondisi operasi yaitu *steady state*. Ketiga adalah pembuatan *mesh* atau *grid* merupakan tahap *pre-processing* pada CFD yang sangat penting, proses *mesh* dapat mempengaruhi salah atau benarnya model simulasi CFD yang digunakan dan kualitas data yang didapatkan.

Ketiga tahap di atas berguna untuk mendefinisikan model dari geometri, domain dan tingkat detail serta kualitas data yang akan disimulasikan.



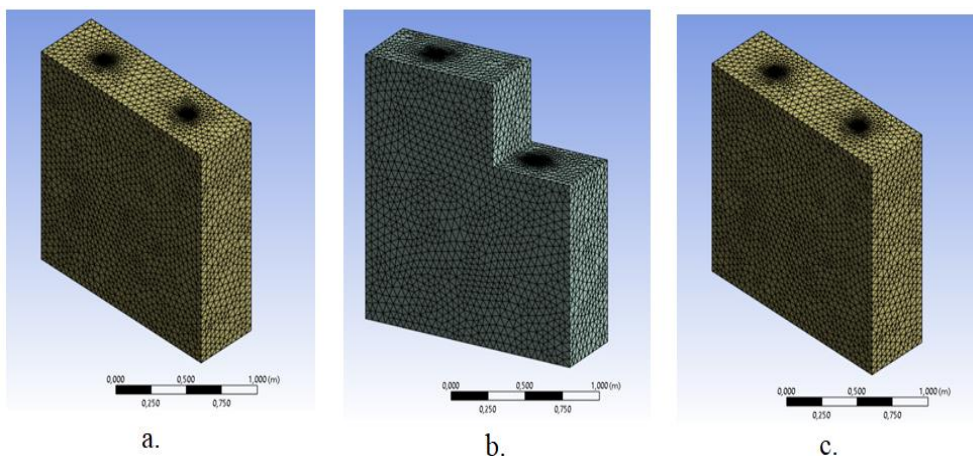
Gambar 3. (a) Model Pipa Tanpa Sumbatan, (b) Model Pipa dengan Sumbatan di Ujung, dan (c) Model Pipa dengan Sumbatan di Tengah.

Geometri untuk model pipa SSH ditampilkan pada tabel 1

Tabel 1. Geometri Pipa SSH.

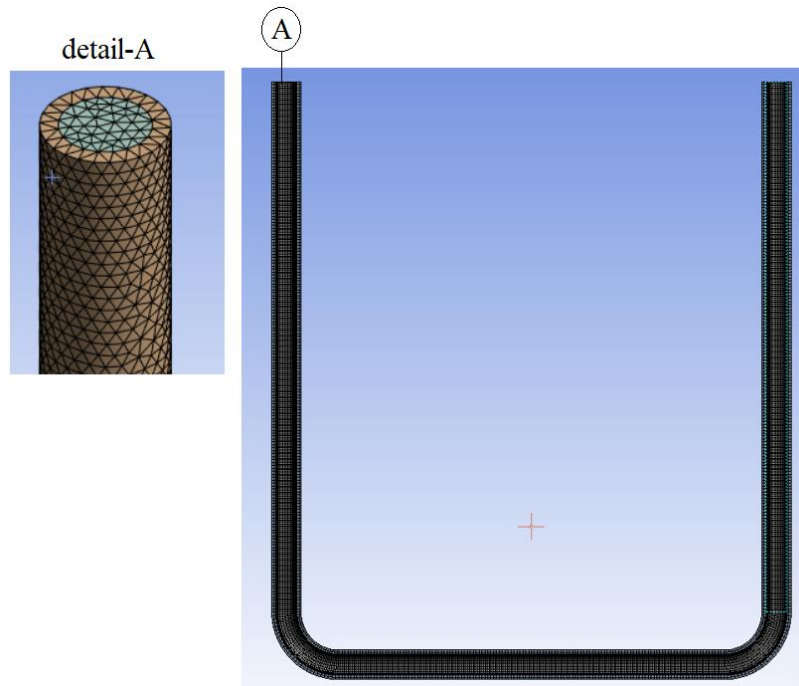
No.	Dimensi	Nilai ukuran	Satuan
1	Lebar	840	mm
2	Tinggi	1000	mm
3	Diameter luar	50	mm
4	Tebal dinding pipa	7	mm
5	Bounding box	500 × 1600 × 1600	mm <sup>3</sup>

Model geometri pipa seperti yang ditampilkan pada Gambar 3 dibuat berbeda untuk melihat bagaimana fenomena aliran uap yang terjadi di dalam pipa pada pipa normal/tanpa sumbatan, ketika aliran mengalami sumbatan baik di ujung pipa maupun sumbatan di bagian tengah pipa. Sedangkan di luar area pipa SSH terdapat area *flue gas*. Untuk memodelkan area *flue gas* dimodelkan *bounding box* untuk ke tiga model pipa SSH. *Bounding box* dimodelkan untuk membatasi area *flue gas* sehingga untuk profil warna temperatur, tekanan dan kecepatan aliran bisa terlihat perbedaannya antara di dalam pipa dengan di luar pipa tersebut. Model *bounding box* yang sudah melalui tahapan *meshing* terlihat seperti pada Gambar 4.



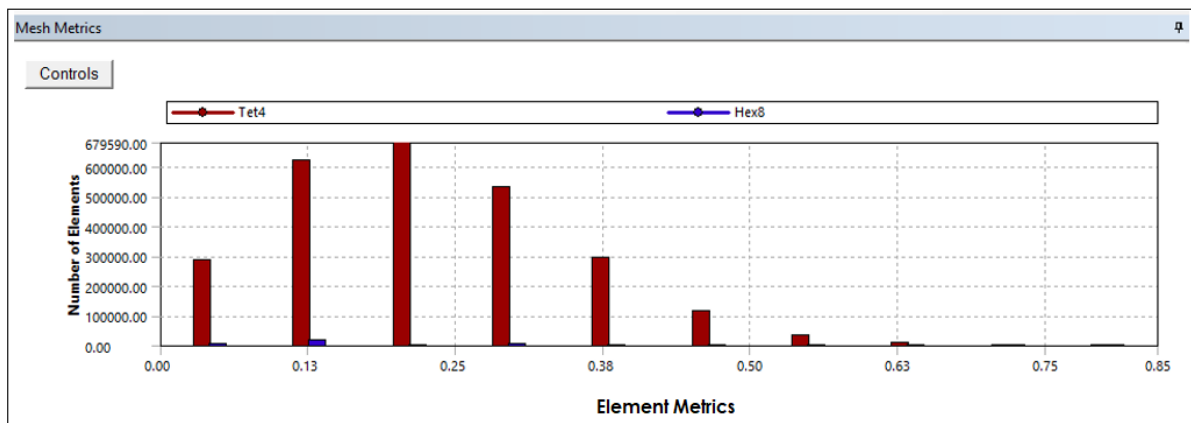
Gambar 4. Bounding Box dengan Mesh untuk Ketiga Model Pipa.





Gambar 5. Model Pipa SSH dengan *Meshing*.

*Meshing* atau *grid* adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit (Yusra, 2008). Semakin baik kualitas *mesh* maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya. Kualitas *mesh* ini sangat penting untuk menjamin hasil simulasi yang dibuat agar bisa sesuai dengan yang diharapkan visualisasi bagus, atau bahkan pada kondisi tertentu *mesh* yang berkualitas rendah dapat membuat simulasi menjadi divergen. Kualitas *meshing* dapat dilihat pada gambar 6 berikut:



Gambar 6. Grafik Kualitas *Mesh*.

Gambar 6 menunjukkan bahwa grafik elemen metrik paling rendah di angka 0,63 dengan jumlah elemen di bawah 100.000. Sedangkan grafik paling tinggi di angka 0,20 dengan jumlah elemen di atas 650.000. Secara umum kualitas *skewness mesh* baik.

## 2.2 Processing

Pada tahap *processing* ini terdiri dari *set up* dan *solution*. untuk *set up* ditentukan kondisi batas (*Boundary Condition*) seperti jenis aliran pada simulasi yang akan dilakukan seperti; kondisi simulasi dalam *steady state*, *viscous model* dipilih k-epsilon dengan model standar, pemilihan material pipa yang digunakan adalah baja, kemudian sifat material baja, sifat dari fluida yaitu uap panas, dan *flue gas*, seperti; tekanan, temperatur, laju aliran massa, dan kecepatan aliran. Semua data tersebut dimasukkan dalam data *set up* agar proses simulasi dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Data *set up* ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Set Up Processing.

No.	Komponen Set up	Type	Parameter	Nilai	Satuan
1	Time dependant	Steady-state	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
2	Viscous model	K-epsilon	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
3	K-epsilon model	Standard	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
4	Material pipa	Steel	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
5	Material fluida	Steam	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
		Flue gas	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
			Kecepatan aliran	0,9727	m/s
			Laju aliran masa	0,046	Kg/s
			Temperatur	497	°C
			Tekanan	150	bar
		Inlet Flue gas	Kecepatan aliran	9,5515	m/s
			Laju aliran masa	0,130	Kg/s
			Temperatur	900	°C
			Tekanan	1	bar
		Outlet Steam	Kecepatan aliran	0,9727	m/s
			Laju aliran masa	0,046	Kg/s
			Temperatur	545	°C
			Tekanan	150	bar
		Outlet Flue gas	Kecepatan aliran	9,5515	m/s
			Laju aliran masa	0,130	Kg/s
	Temperatur	900	°C		
	Tekanan	1	bar		
	Turbulence	Intensity	5	%	
		Viscosity ratio	10	-	
7	Solution	Run calculation	Number of Iteration	1000	-

### 2.3. Post-Processing

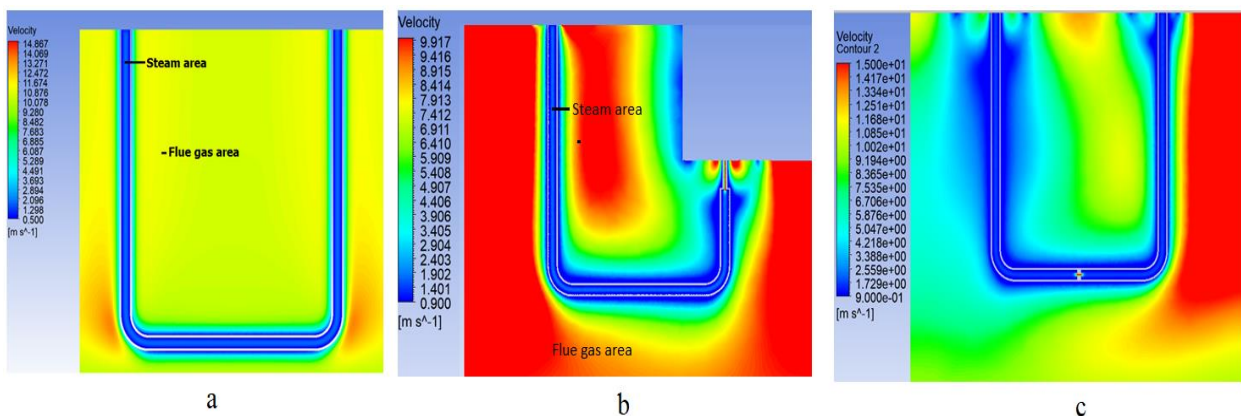
Post-processing merupakan tahap akhir dari simulasi yaitu merupakan tahap penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh berupa visualisasi aliran dengan menampilkan informasi yang diperlukan. Nilai yang dapat dikeluarkan adalah temperatur, tekanan dan kecepatan yang ditampilkan di dalam pipa SSH maupun di luar area pipa SSH.

Hasil simulasi berupa profil warna yang ditampilkan untuk ke tiga model pipa yaitu; model pipa SSH normal (tanpa hambatan), model pipa dengan hambatan di bagian ujung, model pipa dengan hambatan di bagian tengah.

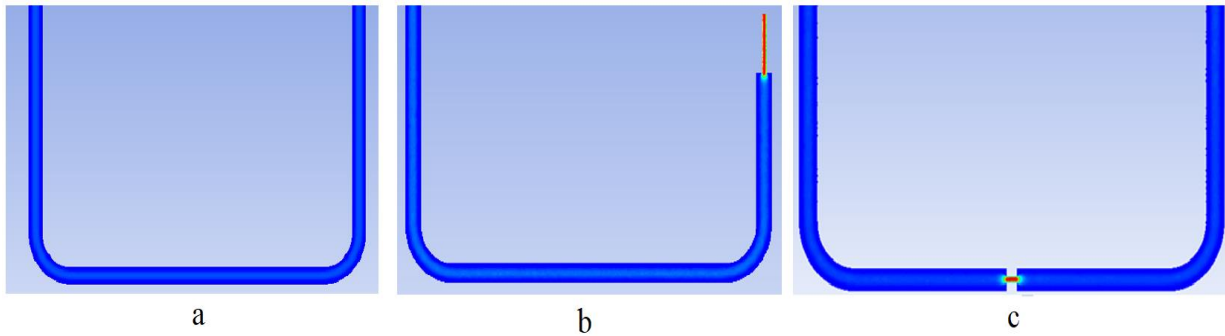
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Kecepatan aliran

Hasil simulasi menunjukkan profil kecepatan fluida pada masing-masing model pipa ditunjukkan pada gambar 7 dan gambar 8 berikut:



Gambar 7. Profil Warna Kecepatan Aliran Flue Gas di Luar Area Pipa SSH.



Gambar 8. Detail Profil Warna Kecepatan Aliran Uap Panas di Dalam Pipa.

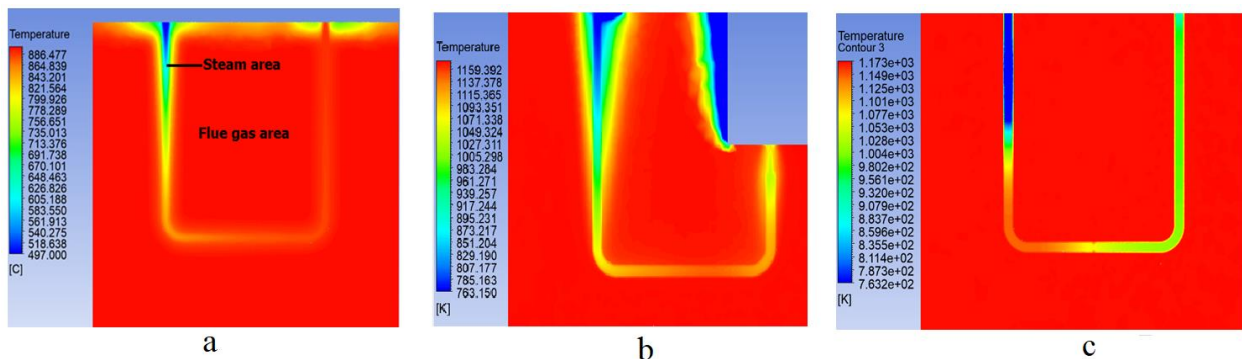
Gambar 7 (a) menunjukkan bahwa jika dilihat dari profil warna kecepatan aliran *flue gas* mengalami perubahan pada area dinding luar pipa baik di sisi vertikal maupun horizontal. Hal ini dikarenakan pipa dianggap sebagai hambatan bagi aliran *flue gas*, sehingga kecepatan aliran *flue gas* akan berkurang pada saat mendekati area pipa dengan kecepatan aliran *flue gas* 7 m/s, tetapi jauh dari area pipa kecepatan aliran *flue gas* cenderung stabil di 10 m/s. Pada sisi *elbow in* dan *sisi elbow out* terjadi perubahan kecepatan aliran *flue gas*. Hal ini dikarenakan setelah melewati pipa yang dianggap sebagai hambatan, maka kecepatan aliran akan meningkat signifikan sekitar 12 m/s. Gambar 7 (b) menunjukkan bahwa pada model pipa dengan sumbatan di bagian *outlet* menunjukkan kecepatan aliran *flue gas* mendekati area pipa terjadi penurunan berkisar 5 m/s. sedangkan di dinding pipa kecepatan aliran *flue gas* menurun drastis hingga 1 m/s. jauh dari area pipa kecepatan aliran *flue gas* cenderung stabil sekitar 9 m/s, hal yang sama terjadi juga pada model pipa dengan sumbatan di bagian tengah seperti yang ditampilkan pada gambar 7 (c).

Gambar 8 (a) menunjukkan bahwa jika dilihat dari profil warna kecepatan aliran uap di dalam pipa tidak mengalami perubahan yang signifikan baik di sisi *inlet* maupun di sisi *outlet*, kecepatan aliran uap berkisar di 1 m/s. Hal ini dikarenakan di dalam pipa tidak terdapat hambatan sehingga uap mengalir dalam keadaan normal. Pada model pipa dengan sumbatan di ujung pada gambar 8 (b) menunjukkan bahwa kecepatan aliran uap di dalam pipa mengalami perubahan yang signifikan pada saat aliran uap melewati sumbatan, karena terjadi pengecilan penampang aliran maka kecepatan aliran uap di dalam pipa menjadi lebih cepat sekitar 8 m/s. Model pipa dengan sumbatan di tengah pada gambar 8 (c) menunjukkan bahwa kecepatan aliran uap di dalam pipa mengalami hal yang sama dengan model pipa yang ditunjukkan pada gambar 8 (b) tetapi setelah melewati area sumbatan, kecepatan aliran kembali normal.

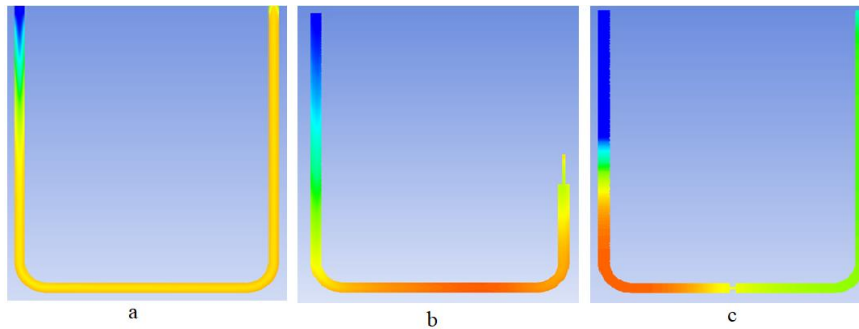
Simulasi ini menunjukkan model hambatan aliran uap panas di beberapa area dalam pipa. Area kritis di dalam pipa adalah pada bagian *elbow in* dan *elbow out* juga area di mana terdapat hambatan di mana aliran uap akan mengalami turbulensi di area tersebut. Dari tampilan profil kecepatan yang jelaskan di atas bisa diketahui bahwa jika suatu aliran fluida mengalami hambatan aliran, maka akan terjadi anomali aliran fluida pada area hambatan sehingga kecepatan aliran fluida akan meningkat signifikan tetapi volume aliran uap akan berkurang dan akan menyebabkan penyerapan panas dari *flue gas* jadi tidak optimal.

### 3.2. Temperatur

Profil/kontur temperatur uap panas di dalam pipa dan temperatur *flue gas* diluar area pipa ditampilkan pada gambar 9 dan gambar 10 berikut:



Gambar 9. Profil Temperatur Uap di Dalam Pipa dan *Flue Gas* di Luar Area Pipa SSH.

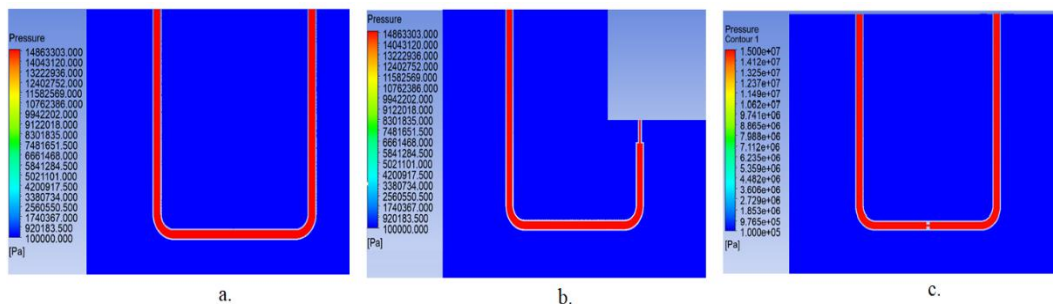


Gambar 10. Detail Profil Temperatur Uap di Dalam Pipa SSH.

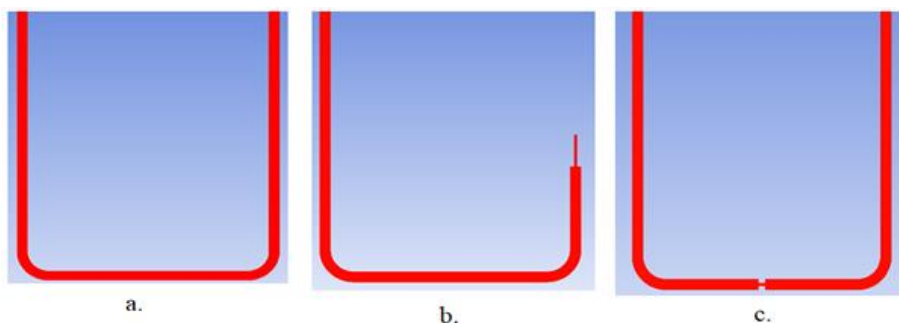
Gambar 9 menunjukkan bahwa temperatur *flue gas* di luar pipa SSH cenderung tetap berada pada nilai temperatur sebesar  $900^{\circ}\text{C}$  hanya terdapat sedikit anomali pada model pipa tanpa sumbatan pada seperti yang ditunjukkan pada gambar 9 (a) dan model pipa dengan sumbatan di ujung *outlet* pada gambar 9 (b) mendekati *bounding box* dan dinding pipa ke arah vertikal temperatur *flue gas* terjadi penurunan, hal ini terjadi karena dinding pipa dan uap di dalam pipa menyerap sebagian panas dari *flue gas* tersebut. Sedangkan pada model pipa dengan sumbatan di tengah seperti yang ditampilkan pada gambar 9 (c) menunjukkan bahwa temperatur lebih stabil tidak mengalami perubahan. Profil temperatur uap di dalam pipa SSH seperti pada gambar 10 menunjukkan pada sisi *inlet* (sisi kiri pipa) temperatur uap berkisar di  $490^{\circ}\text{C}$  dan mulai bergerak naik sebelum melewati sisi *elbow-in*, temperatur uap setelah melewati *elbow in* cenderung stabil hingga menuju *steam outlet* di kisaran  $700^{\circ}\text{C}$  seperti pada gambar 10 (a). Untuk model pipa pada gambar 10 (b) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan temperatur dengan kisaran  $800^{\circ}\text{C}$  pada area horizontal pipa karena aliran uap panas tersumbat di sisi *steam outlet*, tetapi menuju area hambatan temperatur menurun di kisaran  $700^{\circ}\text{C}$  karena uap panas tetap mengalir meskipun melewati diameter yang kecil. Demikian juga fenomena pada pipa model yang ditunjukkan oleh gambar 10 (c) temperatur meningkat jadi  $800^{\circ}\text{C}$  hingga sebelum melewati area *elbow-in* hingga area hambatan di tengah pipa, dan temperatur menurun setelah melewati area hambatan tersebut dengan kisaran  $700^{\circ}\text{C}$ . Kondisi bagian pipa yang tersumbat alirannya secara umum jika melihat profil warna akan menyebabkan perubahan baik dari segi kecepatan aliran maupun temperatur uap.

Dari profil temperatur bisa disimpulkan bahwa temperatur uap panas di dalam pipa meningkat signifikan jika mendekati area hambatan karena aliran uap tersebut terhambat maka penyerapan panas dari *flue gas* di luar area pipa oleh uap di dalam pipa jadi tidak optimal. Jika kondisi ini berkelanjutan material pipa mengalami panas berlebih dan menyebabkan penurunan kekuatan material yang akhirnya terjadi kerusakan pada pipa SSH tersebut.

### 3.3. Tekanan



Gambar 11. Profil Tekanan Uap di Dalam Pipa dan *Flue Gas* di Luar Area Pipa SSH.



Gambar 12. Detail Profil Warna Tekanan Uap di Dalam Pipa SSH.

Gambar 11 menunjukkan bahwa profil tekanan di area *flue gas* yaitu di luar area pipa SSH untuk ketiga model pipa; tanpa hambatan pada gambar 11 (a), pipa dengan hambatan di ujung area *steam outlet* seperti pada gambar 11 (b) dan pipa dengan hambatan di tengah yang ditampilkan pada gambar 11 (c) tidak ada perubahan yang signifikan, tekanan di area *flue gas* ini berkisar di 100.000 Pa atau 1 bar, karena area *flue gas* ini berhubungan langsung dengan udara luar. Gambar 12 menampilkan profil tekanan uap di dalam pipa, untuk model pipa tanpa sumbatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 12 (a), model pipa dengan hambatan di ujung area *steam outlet* ditunjukkan pada gambar 12 (b) dan model pipa dengan hambatan di tengah yang ditunjukkan pada gambar 12 (c) menunjukkan bahwa tekanan uap di dalam pipa stabil di 150 bar karena di sisi *steam inlet* terdapat SSH *inlet header* dan sisi *steam outlet* juga terdapat SSH *outlet header* untuk menjaga tekanan agar stabil sehingga tekanan uap menuju *turbin blade* tetap sama.

Profil tekanan menunjukkan tekanan uap panas di dalam pipa sebesar 150 bar akan berdampak pada pipa yang terdapat hambatan di dalamnya. Volume uap panas di dalam pipa berkurang dan selanjutnya temperatur material pipa semakin tinggi, dan mengakibatkan kekuatan material pipa menurun sehingga pipa memuai lalu menggelembung, menipis dan akhirnya pecah karena tidak mampu menahan tekanan uap panas yang cukup besar di dalam pipa.

### 3.4. Flux Report

Menampilkan hasil kalkulasi melalui proses iterasi dengan jumlah yang sudah ditentukan pada tahap set up, hasil kalkulasi berupa angka-angka yang tampilan seperti *total heat transfer rate*, dan *mass flow rate* pada domain *inlet-outlet steam*, *inlet-outlet flue gas*. Selain itu juga menampilkan *surface integral* untuk nilai rata-rata pada parameter kecepatan aliran, temperatur dan tekanan di daerah pipa maupun di luar pipa SSH. Data *flux report* ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data *flux report* model pipa tanpa sumbatan

No.	Flux report name	Model pipa		
		Tanpa hambatan	Hambatan di ujung	Hambatan di tengah
1.	<i>Total heat transfer rate:</i>			
	a. di dalam pipa	84.755,17 W	80.993,36 W	63.537,22 W
	b. di luar pipa	886.366.912,00 W	885.326.608,80 W	883.214.395,86 W
2.	<i>Mass flow rate:</i>			
	di dalam pipa	0,04 kg/s	0,04 kg/s	0,04 kg/s
	b. di luar pipa	0,130 kg/s	0,13 kg/s	0,13 kg/s
3	<i>Facet average uap:</i>			
	a. Kecepatan aliran			
	Rata-rata	1,06 m/s	1,38 m/s	1,56 m/s
	Maksimum	1,87 m/s	11,79 m/s	12,14 m/s
	b. Temperatur			
	Rata-rata	681,33 °C	648,87 °C	517,77 °C
	Maksimum	874,93 °C	800,74 °C	545,55 °C
	c. Tekanan			
	Rata-rata	15.994.537 Pa	15.624.395,25 Pa	17.445.043 Pa
	Maksimum	16.993.646 Pa	16.248.672 Pa	19.890.086 Pa
	<i>Facet average flue gas:</i>			
	Kecepatan aliran			
	Rata-rata	8,06 m/s	10,17 m/s	10,34 m/s
	Maksimum	13,64 m/s	10,79 m/s	11,13 m/s
	b. Temperatur			
Rata-rata	818,20 °C	807,66 °C	900 °C	
Maksimum	902,84 °C	900 °C	900 °C	
c. Tekanan				
Rata-rata	102183,23 Pa	101325,00 Pa	101325,00 Pa	
Maksimum	106490,55 Pa	101325,00 Pa	101325,00 Pa	

Berdasarkan nilai data *flux report* simulasi terlihat bahwa nilai untuk *heat transfer rate* untuk di luar pipa lebih besar dibandingkan dengan di dalam pipa. Di luar pipa merupakan area *flue gas* yang cukup luas dan memiliki temperatur tinggi sekitar 900°C sedangkan di dalam pipa temperatur uap lebih rendah yaitu sekitar 500°C dibanding di luar pipa. Nilai untuk model pipa tanpa sumbatan lebih besar dibanding model pipa dengan sumbatan. *Mass flow rate* di dalam pipa untuk model pipa tanpa sumbatan maupun model pipa dengan sumbatan tidak terdapat perbedaan nilai yang signifikan dengan melihat hasil dari simulasi di atas, begitu pula pada area luar pipa menunjukkan nilai yang konstan.

Parameter nilai kecepatan aliran, temperatur dan tekanan uap di dalam pipa dan *flue gas* di luar area pipa ditampilkan dari hasil *flux report* dengan menampilkan nilai rata-rata dan nilai maksimum seperti pada tabel 3 di atas. Kecepatan aliran uap di dalam pipa untuk model pipa tanpa sumbatan dan model pipa dengan sumbatan relatif sama

tidak terdapat perbedaan yang signifikan yaitu sekitar 1 m/s, kecepatan aliran uap maksimum ditunjukkan pada model pipa dengan sumbatan sebesar 12 m/s karena uap panas melewati area pipa yang sempit/area sumbatan. Temperatur uap pada model pipa tanpa sumbatan memiliki nilai rata-rata dan nilai maksimum yang tinggi dibanding nilai temperatur uap pada model pipa tanpa sumbatan. Sedangkan tekanan uap rata-rata untuk ke tiga model pipa tidak terlalu jauh perbedaannya, pada model pipa dengan sumbatan di ujung menunjukkan nilai tekanan maksimum yang paling tinggi di angka 19.000.000 Pa.

Parameter untuk *flue gas* menunjukkan bahwa kecepatan aliran *flue gas* rata-rata untuk model pipa tanpa sumbatan berkisar di angka 8 m/s, pada model pipa dengan sumbatan nilainya tidak mengalami perbedaan yang besar dengan angka paling tinggi 10 m/s. Sedangkan nilai kecepatan aliran *flue gas* maksimum di angka 13 m/s pada model pipa tanpa sumbatan, dan pada model pipa dengan sumbatan nilainya tidak jauh rentangnya. Temperatur *flue gas* rata-rata berkisar di angka 800°C sedangkan temperatur maksimum untuk semua model pipa berkisar di angka 900°C. Tekanan *flue gas* rata-rata dan maksimum pada semua model pipa tidak menunjukkan perubahan yaitu sebesar 100.000 Pa, *flue gas* yang berada di area yang luas tekanannya tetap konstan karena berhubungan langsung dengan udara luar.

### Kesimpulan

Hasil simulasi pada model pipa SSH dengan menggunakan CFD Ansys menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai total *heat transfer rate*, *mass flow rate*, dan nilai parameter untuk kecepatan aliran, temperatur serta tekanan tetapi perbedaan nilai tersebut adalah kecil dan tidak signifikan. Hasil simulasi menampilkan profil/kontur warna yang berbeda-beda untuk temperatur, kecepatan aliran dan tekanan untuk uap di dalam pipa dan untuk *flue gas* di luar area pipa, baik pipa tanpa sumbatan maupun pipa dengan sumbatan. *Flux report* menunjukkan nilai *heat transfer rate* area *flue gas* lebih tinggi sekitar 800.000 kW dibanding area uap di dalam pipa sekitar 80 kW, dan nilai *mass flow rate* uap di dalam pipa sebesar 0,046 kg/s sedangkan di area *flue gas* di luar pipa sebesar 0,130 kg/s. Kecepatan aliran uap rata-rata berkisar 1 m/s dan maksimum 12 m/s pada pipa dengan sumbatan, Kecepatan aliran *flue gas* di luar pipa rata-rata berkisar 9 sampai 10 m/s. Temperatur uap rata-rata berkisar 600°C, dan 800°C hingga maksimum 900°C. Tekanan untuk uap tidak mengalami perubahan signifikan yaitu sebesar 16.000.000 Pa dan di area *flue gas* tekanan berkisar di 100.000 Pa.

### Daftar Notasi

$P_a$  = tekanan [Pascal]  
 $T$  = suhu [°C]  
 $W$  = daya [Watt]  
 $kg$  = berat [kilogram]  
 $m$  = jarak [meter]  
 $s$  = waktu [second]

### Daftar Pustaka

- Alireza Rezvanpour, Ronald E. Miller. (2022). *Scaling analysis as a tool to validate CFD simulation of a lubricant flow in the bearing housing of a gas turbine*, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 36 Desember 2022, 101513.
- Constantine Samaras, Jeffrey A. Drezner, Henry H. Willis and Evan Bloom. (2011). *Characterizing the U.S. Industrial Base for Coal-Powered Electricity*. Chapter Title: *Coal-Fired Power Plant Designs, Systems, and Components* RAND Corporation. Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/10.7249/mg1147netl.11>
- Dillon, J.J., Desch, P.B., Lai, T.S., Flynn, D.J. (2011). *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, The McGraw-Hill Companies, Inc. USA
- Lusiana, Fatayalkadri Citrawati, Erie Martides, Gugum Gumilar. (2019). *Analisis Kegagalan Pipa Boiler Superheater Pada Pabrik Kelapa Sawit*. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. doi:10.3372/DJITM.V11I1.9357
- M.J. Djokosetyardjo, (2003) *Ketel uap*, Pradnya Paramita, ISBN 9794081213, 2003
- Malfin, (2018). *Investigasi Performa Perpindahan Panas Winglet Vortex Generator Menggunakan CFD Pada Aliran Internal Pipa Silinder Heat Exchanger*. Skripsi. Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.
- Mariusz Granda, Marcin Trojan, Dawid Taler. (2020). *CFD analysis of steam superheater operation in steady and transient State*, *Energy* 199-117423.
- M. Ghosh, (2023). *Effect of flue gas constituents on boiler tube failure of a captive power plant* *Engineering Failure Analysis* 151 (2023) 107416
- Rossi Cahyaningdias dan Ary Bachtiar Krishna Putra. (2019). *Studi Numerik Perpindahan Panas Konveksi Paksa pada Pin Fin Berpenampang Circular dengan Susunan Aligned*. *Jurnal Teknik ITS* Vol. 8, No. 2, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)
- Ryno Laubscher, Pieter Rousseau. (2019). *CFD study of pulverized coal-fired boiler evaporator and radiant superheaters at varying loads*, *Applied Thermal Engineering* 160-114057.

- Ruben Cabello, et all. (2022). *Heat transfer in pipes with twisted tapes: CFD simulations and validation*, Computers and Chemical Engineering 166 (2022) 107971
- Viki Wahyu Endriyana dkk, (2013). *Analisa Unjuk Kerja Secondary Superheater PLTGU Dan Evaluasi Peluang Peningkatan Effectiveness Dengan Cara Variasi Jarak, Jumlah dan Diameter Tube*. Jurnal Teknik POMITS Vol. 2, No. 3, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)



## Analisis Kegagalan pada Komponen *Work Roll* Setelah Perlakuan Panas

Rifqi Al Hakim<sup>1</sup>, dan Herry Oktadinata<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[rifqialhakim84@gmail.com](mailto:rifqialhakim84@gmail.com), [herry.oktadinata@yahoo.com](mailto:herry.oktadinata@yahoo.com)

### Abstrak

Telah terjadi kegagalan pada komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular setelah dilakukan proses perlakuan panas, kegagalannya yaitu berupa retakan pada permukaan. Dalam proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian atau sebagian dari komponen, konsekuensinya sebagian komponen akan mengalami retak dikarenakan *internal stress*. Tujuan dilakukannya penelitian analisis kegagalan ini yaitu untuk mengetahui penyebab kegagalan pada komponen *work roll*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan visual, pengujian tidak merusak *dye penetrant* dan *ultrasonic test*, pengujian komposisi kimia, pengujian fraktografi, pengujian struktur mikro, dan pengujian kekerasan Rockwell C terhadap komponen *work roll* yang mengalami kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan komponen mempunyai kekerasan tinggi dan mengalami patah getas. Kekerasan yang tinggi tersebut dapat dipengaruhi oleh kandungan 0,275% chromium sebagai pembentuk karbida. Jumlah ini melebihi 0,10% dari komposisi chromium besi tuang nodular yang berakibat karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Retak pada komponen *work roll* juga dapat dipengaruhi oleh konsentrasi tegangan akibat perubahan luas penampang secara tiba-tiba saat dilakukan perlakuan panas yang dipicu oleh porositas, inklusi, dan sudut yang lancip.

Kata kunci: kegagalan, *work roll*, besi tuang nodular, perlakuan panas, struktur mikro

### Abstract

There has been a failure on the work roll components of the nodular cast iron type after the heat treatment, and the failure is in the form of cracks on the surface. In the heat treatment process, it can cover the whole or part of the component, and the consequence is that some elements will crack due to internal stress. This failure analysis research aims to find out the causes failure of work roll component. In this study, were carried out a visual inspection, non-destructive testing of dye penetrant and ultrasonic test, chemical composition test, fractography test microstructure test, and Rockwell C hardness test for the failed work roll components. The results showed that the component had high hardness and become brittle fracture. The content of 0,275% chromium can influence the high hardness of a carbide former. This amount exceeds 0,10% of the chromium composition of nodular cast iron, which makes carbides difficult to remove through heat treatment. Cracks in work roll components can also be affected by stress concentrations due to sudden changes in cross-sectional area during heat treatment triggered by porosity, inclusions, and acute angles.

Keywords: failure, work roll, nodular cast iron, heat treatment, microstructure

### 1. Pendahuluan

Kegagalan sebuah komponen dalam suatu pengoperasian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya pembebanan berlebih, pembebanan siklus, kesalahan desain, kesalahan pemilihan material, kesalahan operator, dan berbagai faktor lainnya (Suripto, 2014). Hal tersebut tentunya akan menimbulkan kerugian sehingga diperlukanantisipasi kemungkinan kegagalan dan tindakan yang tepat untuk menghindari atau meminimalkan kegagalan jika tidak dapat dihindari. Metode sistematis yang digunakan untuk menyelidiki akar penyebab dari mekanisme kegagalan pada suatu komponen adalah analisis kegagalan (Aji & Nugroho, 2014). Penelitiannya tentang kegagalan baut pengikat *gearbox* pada lokomotif kereta rel diesel elektrik yang di analisis melalui pengumpulan data komponen baut, pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan, pengolahan data, dan analisis hasil pengujian. Hasil dari penelitian yang dilakukan Aji dan Nugroho menunjukkan bahwa baut memiliki kandungan komposisi yang tidak sesuai dengan standar yang ditentukan dan mengalami kegagalan akibat patah lelah yang dipercepat dengan proses *quenching* dan *tempering* yang tidak sempurna saat proses pembuatannya.

Pada industri pengolahan baja, komponen *work roll* merupakan *roll* yang berperan penting dalam pengerolan panas (*hot rolled*) dan berfungsi untuk mereduksi tebal serta membentuk *bloom* menjadi baja profil sesuai dengan dimensi yang ditentukan (Hwang, 2020). Salah satu material yang digunakan dalam pembuatan komponen *work roll* yaitu besi

#### Info Makalah:

Dikirim : 26-06-22;

Revisi 1 : 27-10-22;

Diterima : 08-16-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 8956-1548-7695

e-mail : [rifqialhakim84@gmail.com](mailto:rifqialhakim84@gmail.com)

tuang. Besi tuang memiliki temperatur cair yang rendah yaitu sekitar 1150°-1200°C, sehingga dalam proses pengecorannya akan lebih mudah (Suratman & Bandanadjaja, 2017). Pengecoran pasir merupakan salah satu metode pengecoran yang digunakan dalam pembuatan komponen *work roll*. Untuk mendapatkan sifat kekerasan, keuletan, dan keausan yang baik komponen *work roll* diperlukan upaya-upaya sehingga memenuhi standar sebagai komponen untuk proses pengerolan pada bidang industri pengolahan baja. Upaya yang



dilakukan yaitu perlakuan panas, dengan dilakukannya perlakuan panas maka struktur internal pada komponen akan berubah serta akan mengubah juga sifat maupun karakteristiknya (Istiyono, 2009).

Telah dilakukan proses pengecoran komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular. Namun setelah dilakukan perlakuan panas *annealing*, *quenching*, dan *tempering* terjadi kegagalan pada komponen *work roll* tersebut, kegagalannya yaitu berupa retakan pada permukaan komponen *work roll* yang dapat dilihat pada Gambar 1. Menurut Sitompul dan Dharma proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian dari logam atau sebagian dari logam, konsekuensinya akan mengalami retak karena pengaruh *internal stress* (Sitompul & Dharma, 2018). Area komponen yang mengalami retak dapat diamati secara visual, dari pengamatan visual dapat diprediksi jenis kegagalan yang dialami komponen, lalu dapat dilakukan beberapa pengujian yang mengarah ke prediksi pertama yang dapat menjadi pemicu terjadinya kegagalan retak, namun perlu dilakukan analisis lebih mendalam agar penyebab kegagalan dapat diketahui lebih akurat. Kegagalan pada komponen dapat ditelusuri dari latar belakangnya, mulai dari perencanaannya, bahan yang digunakan, proses pembuatannya, dan proses perlakuannya.



Gambar 1. Komponen *Work Roll* yang Mengalami Kegagalan.

Pada penelitian kegagalan komponen *dies* ASSAB 8407 yang dilakukan oleh Susanto terjadi saat proses perlakuan panas dikarenakan proses permesinan yang kurang baik. Jari-jari sudut sangat kecil mengakibatkan terjadinya konsentrasi tegangan yang terjadi saat proses pemanasan dan pendinginan. Jari-jari sudut yang terlalu kecil menyebabkan awal terjadinya keretakan hingga merambat ke daerah lain. Selain itu juga profil komponen *dies* terdapat perbedaan ketebalan pada desainnya. Akibatnya penyebaran panas tidak merata sehingga saat proses *preheating* akan terjadi tegangan yang tidak sama pada komponen. Dari pengujian SEM keretakan yang terjadi adalah retak getas yang berciri alur sungai yang disebabkan oleh perambatan retak melalui kristal bidang sejajar yang membentuk lembah dan tepi yang tajam (Susanto, 2008).

Dari penelitian Sutowo, Kartika, dan Priyono terkait dengan kegagalan pada *camshaft* berjenis besi tuang meleabel terjadi saat proses perlakuan panas yang terindikasi dengan adanya retakan mikro yang terlihat pada pengujian fraktografi menggunakan SEM. Adanya retakan sekunder yang dipicu oleh inklusi juga teramati pada hasil struktur mikro. Patahan yang terjadi pada *camshaft* berjenis besi tuang meleabel adalah patah ulet-getas di mana pada area patah ulet terjadi patahan merambat sepanjang grafit dan batas butir ferit pada komponen tersebut (Sutowo dkk., 2015).

Sedangkan pada penelitian Sutowo, Senopati, Kartika, dan Priyono diketahui bahwa area komponen *cylinder block* berjenis besi tuang kelabu yang mengalami kegagalan retak diakibatkan langsung di *install* tanpa perlakuan panas, terbentuknya struktur dendrit yang membuat besi tuang lebih bersifat getas yang akan menyebabkan *cylinder block* mudah retak akibat adanya tegangan sisa saat proses permesinan. Patahan yang terjadi berdasarkan hasil pengujian SEM adalah patah getas. Adanya porositas, inklusi, dan retak mikro yang terlihat pada pengujian struktur mikro memberi peluang penjalaran retak (Sutowo dkk., 2016).

Kegagalan pada komponen *work roll* merupakan peristiwa yang tidak diharapkan dan akan menimbulkan kerugian biaya produksi bagi industri pengolahan baja sehingga perlu dilakukan penelitian analisis kegagalan untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *work roll* agar kegagalan yang serupa tidak terjadi kembali. Pada beberapa penelitian analisis kegagalan yang sudah dilakukan sebelumnya komponen yang dianalisis adalah komponen yang mengalami kegagalan setelah di *install* atau diaplikasikan pada penggunaannya, sedangkan pada penelitian analisis kegagalan pada komponen *work roll* ini dianalisis sebelum digunakan pada industri baja sebagai *hot rolled* (pengerolan panas) dikarenakan terjadi kegagalan saat proses manufakturnya.

Manfaat dari dilakukannya penelitian analisis kegagalan ini dalam jangka pendek diharapkan dapat memperbaiki desain dan proses manufakturnya. Sedangkan untuk jangka panjang dapat digunakan sebagai pengembangan

komponen *work roll* serta sebagai metode terkini untuk mengevaluasi dan memperkirakan kualitas dari komponen *work roll* di industri pengolahan baja.

## 2. Metode

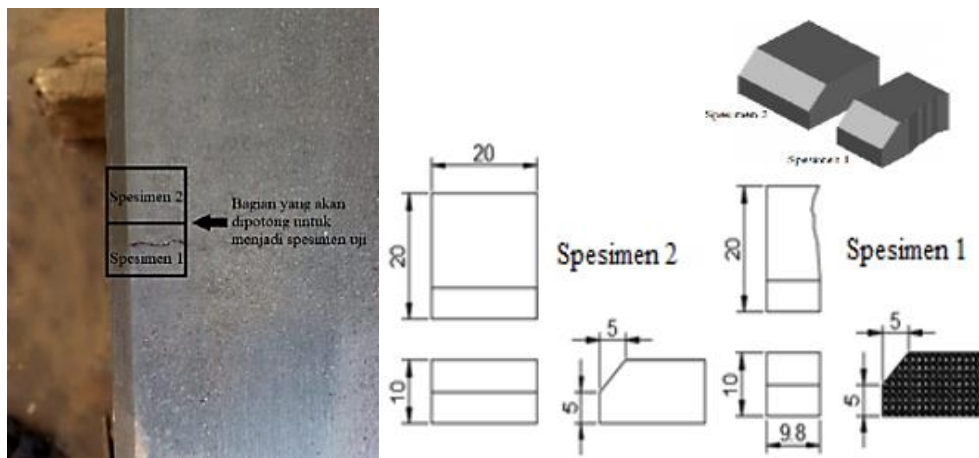
### 2.1. Persiapan

Pada penelitian ini menggunakan komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular yang mengalami kegagalan setelah dilakukan perlakuan panas. Komponen tersebut sebelumnya sudah melalui beberapa proses tahapan manufaktur yang terdiri dari proses pengecoran, *machining*, hingga perlakuan panas. Di dalam penelitian ini dilakukan beberapa pengujian terhadap komponen *work roll* yang mengalami kegagalan.

Pada Gambar 2 dapat dilihat terdapat komponen *work roll* yang akan dilakukan pengujian tidak merusak (*dye penetrant* dan *ultrasonic test*) serta pengujian kekerasan Rockwell C untuk mengetahui cacat dan nilai kekerasan pada komponen. Sedangkan pada Gambar 3 dapat dilihat terdapat dua buah spesimen uji yang dipotong dari bagian retakan *work roll* digunakan untuk pengujian fraktografi menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) yang bertujuan untuk menganalisis jenis patahan dan pola patahan pada spesimen 1, sedangkan untuk spesimen 2 digunakan untuk mengamati struktur mikro menggunakan *optical microscope*.



Gambar 2. Komponen *Work Roll* yang Akan Dilakukan Pengujian Tidak Merusak dan Pengujian Kekerasan.

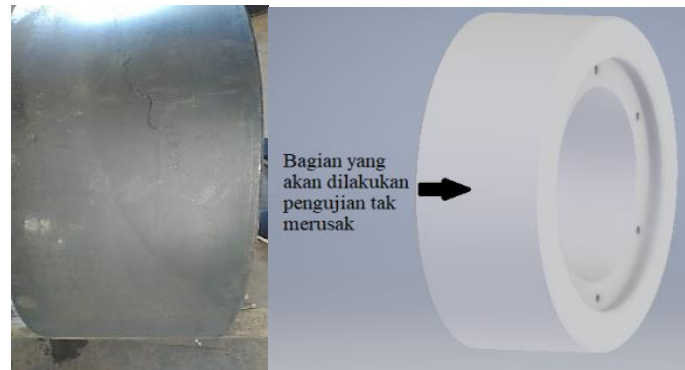


Gambar 3. Spesimen 1 dan Spesimen 2 yang akan Dilakukan Pengujian Fraktografi dan Struktur Mikro.

### 2.2. Pengujian Tidak Merusak

Area yang mengalami kegagalan pada komponen *work roll* diamati secara visual dengan metode pengujian tidak merusak (*dye penetrant* dan *ultrasonic test*) yang dapat dilihat pada Gambar 4 sehingga dari pengamatan secara visual ini akan diketahui daerah yang mengalami retak dan dapat diketahui juga kedalaman retak yang terjadi pada komponen *work roll*. Pengujian tidak merusak ini mengacu pada standar ASTM E 1417 untuk *dye penetrant test* di mana komponen *work roll* perlu dibersihkan terlebih dahulu menggunakan *cleaner* untuk menghilangkan kotoran-kotoran sisa pengecoran, permesinan, dan perlakuan panas lalu disemprotkan *penetrant* pada permukaan komponen *work roll* dan ditunggu beberapa menit kemudian dibersihkan kembali dan semprotkan *developer* pada permukaan komponen *work roll* untuk mengamati cacat.

Sedangkan untuk *ultrasonic test* mengacu pada standar ASTM E 797. Prosedurnya dengan memasang terlebih dahulu *probe* pada *display ultrasonic flaw detector* lalu atur *velocity* untuk logam pada *display*. Sebelum menguji diharuskan mengkalibrasi terlebih dahulu pada blok kalibrasi agar hasil yang didapatkan akurat. Jika sudah dikalibrasi lakukan pengujian pada permukaan komponen *work roll*.



Gambar 4. Komponen *Work Roll* yang Akan Dilakukan Pengujian Tidak Merusak.

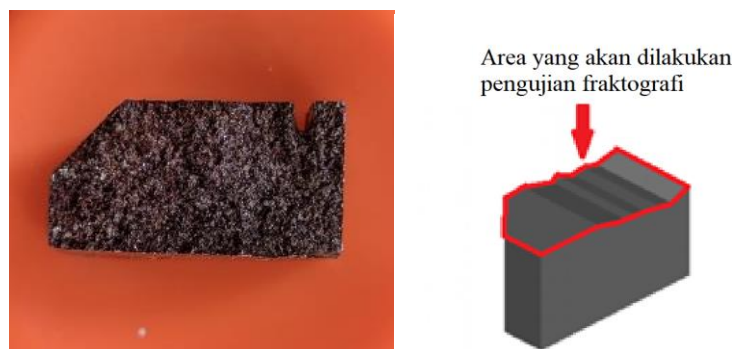
### 2.3. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan sesuai standar (ASTM E 1999). Pada pengujian komposisi ini dilakukan saat proses pengecoran pada *ladle*. Alat yang digunakan untuk pengujian komposisi kimia yaitu menggunakan alat uji spektrometer. Dengan alat tersebut maka dapat diketahui presentase unsur kimia yang terkandung pada komponen *work roll*. Prosedurnya nyalakan terlebih dahulu alat uji spektrometer lalu potong spesimen uji sesuai dengan bentuk *holder*, selanjutnya pasangkan spesimen pada *holder* dan lakukan penembakan pada spesimen uji selama 30 detik hingga berbekas dan untuk hasil pengujian dapat dilihat pada *display* alat uji.

### 2.4. Pengujian Fraktografi

Pengujian fraktografi dilakukan dengan menggunakan mesin *scanning electron microscope* (SEM). *Scanning electron microscope* merupakan mikroskop elektron yang dapat digunakan dalam menganalisa permukaan objek solid secara langsung. Dengan mesin ini jenis patahan dan pola patahan dapat diketahui. Hal yang perlu diperhatikan dalam pengamatan fraktografi ini yaitu spesimen uji tidak perlu melalui proses preparasi seperti diampas atau dipoles karena apabila melalui preparasi maka bentuk perpatahannya akan hilang. Dalam pengujian fraktografi ini menggunakan standar pengujian *Manual Book SEM Hitachi SU3500 With EDAX Octane Pro*.

Pada Gambar 5 dapat dilihat spesimen 1 yang akan dilakukan pengujian fraktografi. Prosedur yang dilakukan dalam pengamatan fraktografi menggunakan mesin *scanning electron microscope* terhadap spesimen 1 yaitu pertama-tama debu dan pengotor ringan dibersihkan terlebih dahulu menggunakan *blower* pada spesimen yang uji yang sudah dipotong, selanjutnya letakan spesimen uji pada *holder* yang sebelumnya sudah diberi *carbon tape* yang berfungsi melekatkan *holder* dengan spesimen uji, lalu masukan spesimen uji ke dalam mesin *scanning electron microscope* (SEM), dan terakhir lakukan pengamatan pada layar komputer sehingga akan terlihat permukaan spesimen uji dengan pembesaran 500-1000 kali.



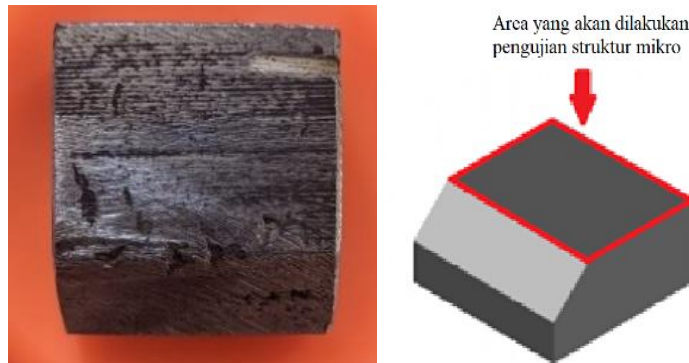
Gambar 5. Spesimen 1 untuk Pengujian Fraktografi.

### 2.5. Pengujian Struktur Mikro

Pada analisis kegagalan, pengujian struktur mikro membantu untuk mengetahui perlakuan apa yang dialami oleh sampel uji. Pemeriksaan struktur mikro membantu untuk memperoleh informasi seperti morfologi, pengamatan cacat, dan retakan. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Pengujian ini dilakukan pada area di sekitar spesimen uji. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan standar (ASTM E3-11).

Pada Gambar 6 dapat dilihat spesimen 2 yang akan dilakukan pengujian struktur mikro. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian struktur mikro menggunakan *optical microscope* terhadap spesimen 2 yaitu siapkan terlebih dahulu spesimen uji yang akan diamati oleh mikroskop, selanjutnya haluskan permukaan spesimen uji dengan menggunakan

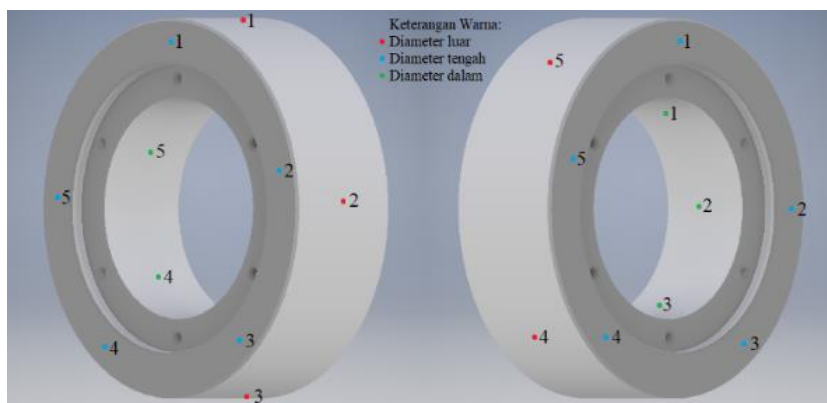
ampas secara bertahap dari grit #80 hingga #2000 (dari kasar sampai halus) dan harus menggunakan air agar permukaan spesimen uji halus dan rata, selanjutnya poles permukaan spesimen uji dengan zat alumina pada kain beludru sampai spesimen uji mengkilap dan goresan hilang, lalu masukan spesimen uji ke dalam cairan etsa nital 2% selama 2 detik dan terakhir lakukan pengamatan pada permukaan spesimen uji dan foto struktur mikro dengan menggunakan *optical microscope* dengan pembesaran 100x.



Gambar 6. Spesimen 2 untuk Pengujian Struktur Mikro.

## 2.6. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan dengan melakukan indentasi 5 titik pada bagian luar, tengah, dan dalam pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan yang dapat dilihat pada Gambar 7. Pengujian kekerasan dilakukan dengan standar pengujian (ASTM E18) menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian kekerasan menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell C yaitu nyalakan tombol *power* pada alat, lalu pilih *scale* untuk memilih skala kekerasan Rockwell C, berikutnya pilih tombol material untuk memilih material besi tuang nodular, pilih arah *direction* atau arah impak lalu letakan *probe* pada komponen *work roll* dan tekan hingga berbunyi klik setelah bunyi lepaskan tombol pada *probe* dan lakukan pengujian sebanyak 3 hingga 5 kali.



Gambar 7. Komponen *Work Roll* yang akan Dilakukan Pengujian Kekerasan.

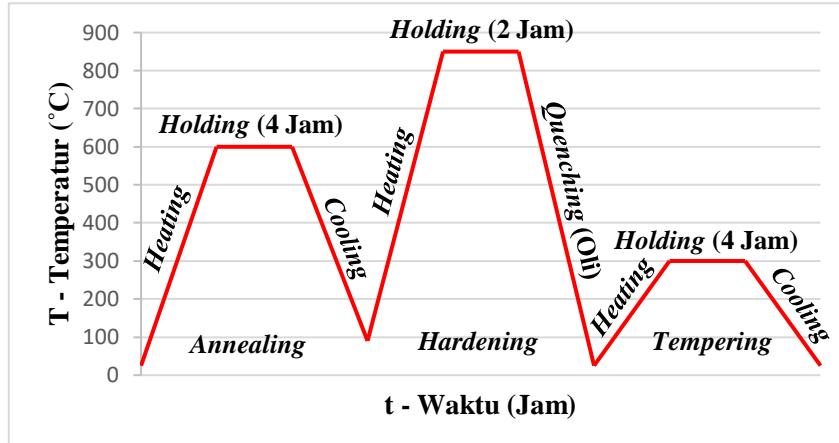
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Tinjauan Proses Manufaktur Komponen *Work Roll*

Komponen *work roll* diproduksi dengan metode *sand casting* (pengecoran pasir) yang terdiri dari beberapa tahapan proses dimulai dengan persiapan bahan baku. Bahan baku yang digunakan pada pembuatan komponen *work roll* adalah potongan *work roll*, *steel scrap*, yang dicairkan menggunakan *electric arc furnace* kapasitas 2500 kg yang dilakukan pada temperatur di atas 1150°C selama 6 jam. Selanjutnya dilakukan pembuatan cetakan yang terbuat dari pasir kering dengan mencampurkan pasir silika dan *water glass*. Pola yang digunakan untuk membuat komponen *work roll* terbuat dari polisterina yang merupakan pola belah. Lalu dilakukan penambahan bahan paduan yang berfungsi untuk menyesuaikan komposisi logam cair. Penambahan bahan paduan dilakukan dengan memasukkan paduan ke dalam *electric arc furnace* setelah potongan *work roll* dan *steel scrap* melebur. Nodularisasi juga diperlukan untuk memproduksi grafit yang berbentuk bulat dengan menempatkan unsur Mg yang merupakan unsur pembulat yang terkandung pada Fe-Si-Mg pada bawah *ladle* dan ditutup dengan *steel chip* lalu dituangkan ke dalam cetakan dengan *ladle* berkapasitas 2200 kg.



Setelah proses pengecoran komponen *work roll as cast* perlu dilakukan proses *machining* dengan menggunakan *turning machine*. Dikarenakan komponen *work roll* tersebut akan di aplikasikan untuk *hot rolled* (pengerolan panas) maka diperlukan kekerasan, keuletan, dan ketahanan aus yang baik sehingga perlu dilakukan proses perlakuan panas pada komponen *work roll as cast*. Perlakuan panas pada komponen tersebut meliputi *annealing*, *hardening*, dan *tempering* yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Perlakuan Panas pada Komponen *Work Roll*.

Dari Gambar 8 dapat dilihat proses *annealing* dilakukan dengan memasukkan komponen *work roll* ke dalam *furnace* lalu dilakukan pemanasan secara perlahan agar tidak terjadi *thermal shock* hingga mencapai temperatur 600°C. Setelah temperatur sudah tercapai pada 600°C dilakukan *holding* di dalam *furnace* selama 4 jam agar panas yang menyebar merata pada semua bagian komponen *work roll* lalu dilakukan pendinginan di dalam *furnace*. Untuk proses *hardening* komponen *work roll* dipanaskan secara perlahan pada *furnace* hingga mencapai temperatur austenisasi 850°C. Setelah mencapai temperatur 850°C lalu di *holding* di dalam *furnace* selama 2 jam. Setelah di *holding* selama 2 jam, dilakukan *quenching* pada media oli untuk mendapatkan sifat kekerasan sesuai dengan standar komponen *work roll*. Sedangkan untuk proses *tempering* komponen *work roll* di masukan kedalam *furnace* kembali lalu dipanaskan hingga mencapai temperatur 300°C lalu di *holding* selama 4 jam di dalam tungku lalu didinginkan pada *furnace* dengan kondisi pintu *furnace* terbuka.

### 3.2. Pengujian Tidak Merusak

Pada pengujian tidak merusak dilakukan untuk mengetahui cacat yang terjadi pada bagian permukaan maupun bagian dalam komponen *work roll* setelah dilakukan perlakuan panas dengan menggunakan *dye penetrant* dan *ultrasonic flaw detector* yang dapat dilihat pada Gambar 9 melalui pengamatan visual. Pengujian tidak merusak ini mengacu pada standar ASTM E 1417 untuk *dye penetrant test* dan ASTM E 797 untuk *ultrasonic test*.

Berdasarkan dari pengamatan visual pada *work roll* setelah dilakukan *dye penetrant test* yang dapat dilihat pada Gambar 9 (a) bahwa retakan terjadi dan merambat hampir setengah dari diameter pada komponen *work roll*. Ukuran retaknya pun bervariasi, terdapat retakan yang berukuran kecil hingga berukuran besar. Retakan awal kemungkinan besar terjadi karena dipengaruhi sudut hasil proses *machining* pada ujung *chamfer work roll* lalu melewati bagian tengah pada permukaan dan retakan akhir kembali pada *chamfer* pada posisi yang berbeda. Sedangkan dari pengujian *ultrasonic test* yang dapat dilihat pada Gambar 9 (b) menggunakan *ultrasonic flaw detector* dapat dilihat bahwa tingkat kedalaman retakan bervariasi dengan maksimal retakan pada *work roll* mencapai kedalaman hingga 19mm.



Gambar 9. Kegagalan retak pada komponen *work roll* setelah dilakukan pengujian tidak merusak (a) *dye penetrant* dan (b) *ultrasonic test*

### 3.3. Pengujian Komposisi Kimia

Pada pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan mesin uji spektrometer yang dilakukan saat proses pengecoran yang diambil pada *ladle* untuk mengetahui apakah komposisi pada komponen *work roll* sesuai dengan standar yang ditetapkan. Pengujian komposisi kimia ini menggunakan standar ASTM E 1999. Setelah komposisi kimia dari komponen *work roll* diperoleh dapat dikomparasikan dengan komposisi kimia besi tuang nodular menurut buku *ductile iron book*.

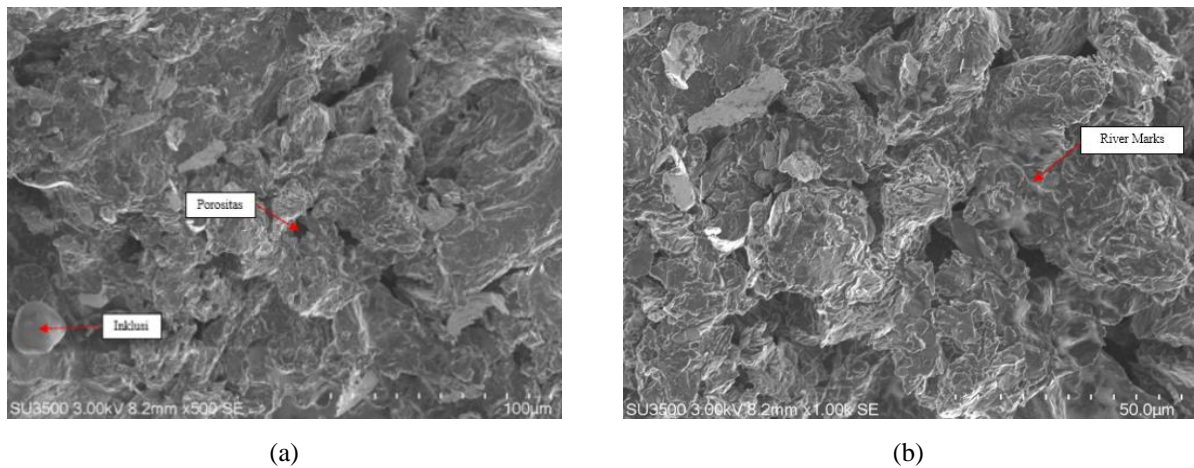
Dari komparasi komposisi kimia yang dapat dilihat pada Tabel 1 antara komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular dengan komposisi kimia besi tuang nodular yang sesuai dengan buku *ductile iron book* (Henning.W.A. & Mercer, 1993) dapat dilihat unsur Cr (Chromium) sebagai elemen pembentuk karbida dan perlit berada pada nilai 0,275% berarti nilai tersebut melebihi dari nilai 0,10% hal ini akan berdampak karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Mg (Magnesium) sebagai unsur yang berperan dalam pembentukan nodul ada pada nilai 0,100% berarti nilai tersebut melebihi dari *range* nilai 0,02-0,08% hal ini akan menyebabkan pembentukan karbida yang berlebih (Henning.W.A. & Mercer, 1993).

Tabel 1. Komparasi Komposisi Kimia.

Komposisi kimia komponen <i>work roll</i> besi tuang nodular					
No.	Unsur kimia	Komposisi (%)	No.	Unsur kimia	Komposisi (%)
1.	C	3,45	8.	Mo	0,177
2.	Si	2,60	9.	Mg	0,100
3.	Mn	0,635	10.	Al	0,0260
4.	P	0,0304	11.	Cu	0,0240
5.	S	0,0024	12.	V	0,0114
6.	Cr	0,275	13.	Ti	0,0128
7.	Ni	1,58	14.	As	0,0071
Komposisi kimia besi tuang nodular (Henning.W.A. & Mercer, 1993)					
No.	Unsur kimia	Komposisi (%)	No.	Unsur kimia	Komposisi (%)
1.	C	3,00-4,00	8.	Mo	0,01-0,75
2.	Si	1,80-2,75	9.	Mg	0,02-0,08
3.	Mn	0,80 <i>Max</i>	10.	Al	0,05 <i>Max</i>
4.	P	0,05 <i>Max</i>	11.	Cu	0,01-0,90
5.	S	0,02 <i>Max</i>	12.	V	0,05 <i>Max</i>
6.	Cr	0,10 <i>Max</i>	13.	Ti	0,07 <i>Max</i>
7.	Ni	0,01-2,00	14.	As	0,05 <i>Max</i>

### 3.4. Pengujian Fraktografi

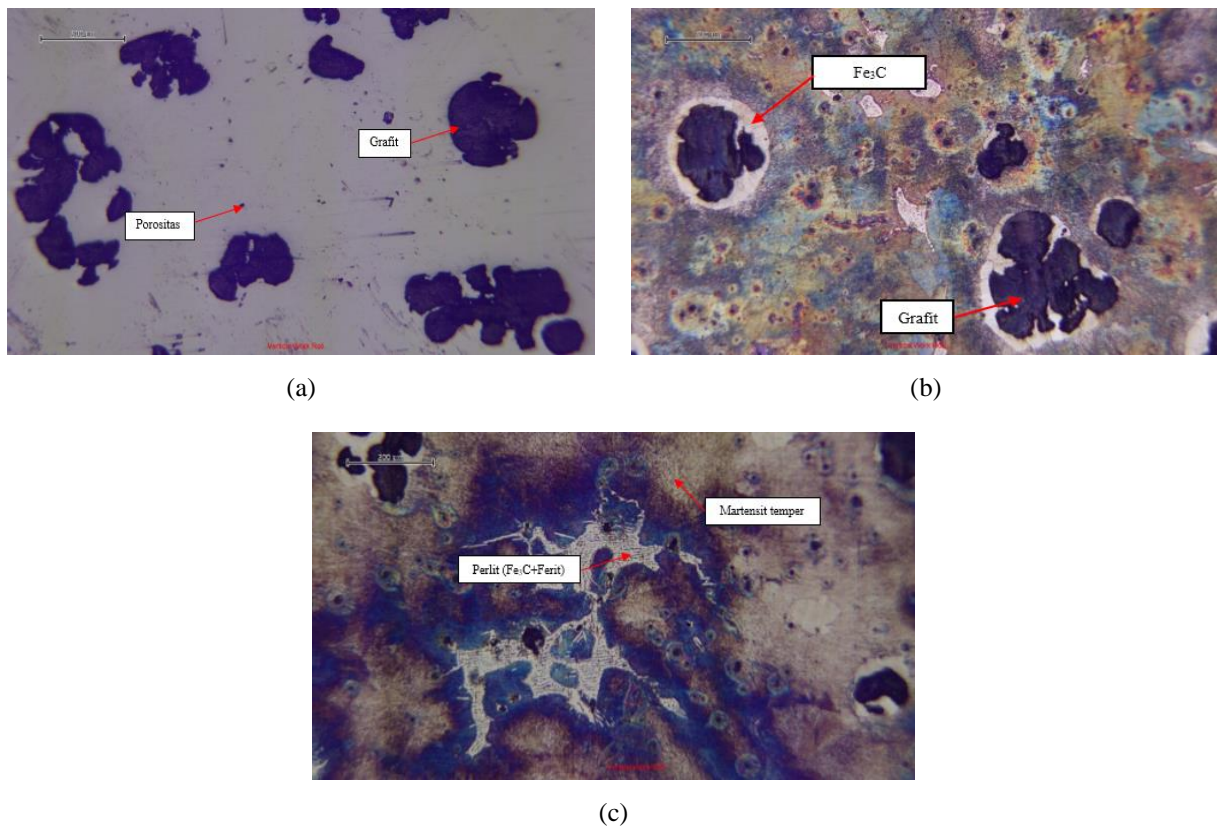
Berikut ini adalah hasil dari pengujian fraktografi menggunakan mesin uji SEM yang dilakukan pada spesimen uji 1 yang dapat dilihat pada Gambar 10. Dalam pengujian fraktografi ini mengacu dengan standar pengujian *Manual Book SEM Hitachi*. Dari pengujian fraktografi menggunakan mesin SEM dapat terlihat bahwa keretakan yang terjadi adalah keretakan getas yang ciri utamanya adalah alur sungai (*river marking*). Ciri tersebut disebabkan oleh perambatan retak melalui kristal sepanjang sejumlah bidang sejajar yang membentuk lembah dan tepi yang tajam (Susanto, 2008). Hal tersebut serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Susanto. Dari hasil pengujian SEM juga terlihat adanya porositas. Porositas bisa terjadi dikarenakan terjebaknya gelembung-gelembung gas yang terperangkap pada cairan logam saat proses pengecoran. Dengan adanya porositas akan memberikan pengaruh pada hasil coran dan akan menjadi pemusat tegangan sehingga akan memicu terjadinya retak. Selain itu juga pada hasil pengujian SEM terlihat adanya inklusi. Inklusi ini dapat terjadi akibat masuknya terak atau bahan bukan logam ke dalam cairan logam ke dalam cairan logam yang diakibatkan oleh reaksi kimia selama proses peleburan, penuangan, dan pembekuan.



Gambar 10. Hasil pengujian fraktografi menggunakan SEM spesimen uji 1 pada pembesaran: (a) 500x dan (b) 1000x

### 3.5. Struktur Mikro

Berikut ini adalah hasil dari pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik yang dilakukan pada spesimen uji 2 yang dapat dilihat pada Gambar 11. Pada pengujian struktur mikro ini mengacu pada standar pengujian ASTM E 3-11. Berdasarkan dari hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan memiliki struktur khas besi tuang nodular yang terdiri dari grafit berbentuk bulat dengan matrik perlit. Perlit merupakan struktur yang berbentuk lapisan dari ferit yang liat dan sementit yang keras dan getas. Jadi matrik perlit bersifat baik sekali ketahanan ausnya. Pada hasil pengujian juga terlihat adanya struktur martensit temper yang artinya bahwa komponen *work roll* sudah melalui proses temper yang baik. Namun tampak juga banyak porositas pada hasil pengujian struktur mikro.



Gambar 11. Struktur Mikro Spesimen Uji 2 pada Pembesaran 100x: (a) Tanpa Etsa, (b-c) Etsa Nital 2%.

### 3.6. Pengujian Kekerasan

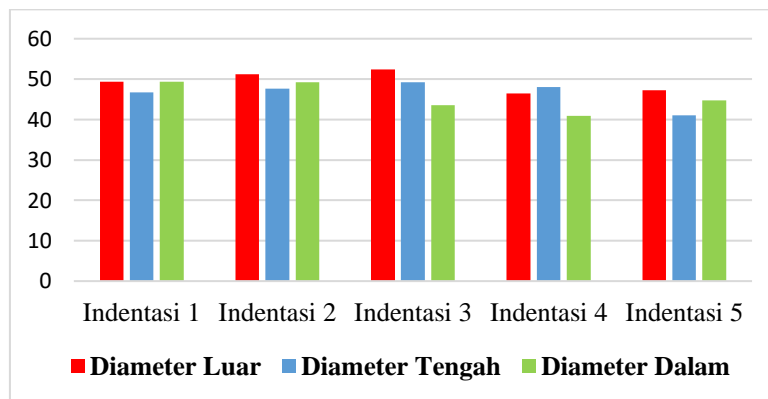
Pengujian kekerasan ini digunakan untuk mengetahui nilai distribusi kekerasan pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan. Pada pengujian kekerasan dilakukan pada bagian diameter luar, diameter tengah, dan diameter dalam dalam masing-masing sebanyak 5 titik indentasi menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell C.

Berdasarkan dari pengujian kekerasan yang dilakukan pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan setelah perlakuan panas dapat dilihat pada Tabel 2 bahwa nilai kekerasan tertinggi berada pada bagian luar *work roll* setelah dilakukan 5 titik indentasi pada masing-masing bagian yaitu sebesar 49,3 HRC, 51,2 HRC, 52,4 HRC, 46,5 HRC, dan 47,2 HRC sedangkan pada bagian tengah memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian luar sebesar 46,7 HRC, 47,6 HRC, 49,2 HRC, 41,0 HRC, dan 41,0 HRC begitu pun untuk bagian dalam yaitu 49,3 HRC, 49,2 HRC, 43,5 HRC, 40,9 HRC, dan 40,7 HRC.

Dapat diperjelas melalui grafik batang yang dapat dilihat pada Gambar 12 bahwa nilai kekerasan rata-rata tertinggi ada pada bagian diameter luar komponen *work roll* yaitu sebesar 49,3 HRC yang artinya saat dilakukan perlakuan panas penyebaran panas tidak menyebar dengan merata pada bagian luar, bagian tengah dan bagian dalam sehingga bagian dalam dan bagian tengah cenderung memiliki nilai kekerasan yang lebih kecil dibandingkan dengan bagian luar.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Kekerasan.

Nilai kekerasan (HRC)			
Daerah indentasi	Diameter luar	Diameter tengah	Diameter dalam
1	49,3 HRC	46,7 HRC	49,3 HRC
2	51,2 HRC	47,6 HRC	49,2 HRC
3	52,4 HRC	49,2 HRC	43,5 HRC
4	46,5 HRC	41,0 HRC	40,9 HRC
5	47,2 HRC	41,0 HRC	40,7 HRC
Rata-rata	49,3 HRC	46,5 HRC	44,7 HRC



Gambar 12. Grafik Hasil Pengujian Kekerasan.

### Kesimpulan

Setelah dilakukan pengumpulan data, beberapa pengujian, dan hasil pembahasan komponen *work roll* sudah dilakukan proses perlakuan panas sesuai dengan standar yang ditentukan untuk jenis material besi tuang nodular, namun dari hasil pengujian komposisi kimia komponen *work roll* memiliki unsur Cr (Chromium) yang tidak sesuai dengan standar yang ditentukan. Unsur Cr (Chromium) yang berlebih pada komponen *work roll* menunjukkan komponen *work roll* akan menjadi getas dan dapat memicu terjadinya keretakan saat dilakukan perlakuan panas.

Unsur Cr (Chromium) sebagai elemen pembentuk karbida dan perlit berada pada 0,275%, persentase tersebut melebihi 0,10% pada komposisi Cr (Chromium) besi tuang nodular yang berakibat karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Selain itu unsur Mg (Magnesium) sebagai elemen pembulat berada pada 0,100%, persentase tersebut melebihi *range* 0,02-0,08% pada komposisi Mg (Magnesium) besi tuang nodular sehingga akan berakibat terbentuknya karbida yang berlebih. Unsur kimia Cr (Chromium) dan Mg (Magnesium) yang berlebih pada komponen *work roll* akan membuat komponen menjadi getas yang dibuktikan dengan bentuk patahannya yang berbentuk patah getas secara *transgranular* yang bercirikan *river marks* pada pengujian fraktografi menggunakan SEM. Hal tersebut juga dibuktikan dengan hasil pengujian struktur mikro terdapat karbida primer yang dikarenakan tingginya kadar komposisi unsur Cr (Chromium) dan Mg (Magnesium). Dari hasil pengujian fraktografi dapat terlihat adanya porositas dan inklusi yang dapat berpotensi menjadi konsentrasi tegangan saat dilakukan perlakuan panas.

Sedangkan dari komponen *work roll* memiliki ketebalan yang tidak seragam yang dibuktikan dengan pengujian kekerasan terdapat nilai kekerasan yang berbeda antara bagian luar (49,3 HRC), tengah (46,5 HRC), dan dalam (44,7



HRC). Desain komponen *work roll* juga terdapat sudut yang lancip yang dapat menjadi pusat konsentrasi tegangan. Dari beberapa faktor tersebut bisa menjadi faktor terjadinya kegagalan retak pada *work roll* saat dilakukan perlakuan panas. Kegagalan pada komponen *work roll* terjadi saat proses perlakuan panas yang disebabkan oleh sifat material yang bersifat getas. Adanya porositas, inklusi, dan sudut yang lancip pada desain komponen *work roll* dapat menjadi sumber konsentrasi tegangan saat dilakukan perlakuan panas.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas dukungan finansialnya melalui kegiatan Matching Fund 2021.

### Daftar Notasi

%	= Persen
Al	= Aluminium
As	= Arsen
ASTM	= <i>American Standard Testing and Material</i>
C	= Carbon
Cr	= Chromium
Cu	= Cuprum
°C	= Derajat <i>Celcius</i>
HRC	= <i>Hardness Rockwell C</i>
kg	= Kilogram
Mg	= Magnesium
Mn	= Mangan
Mo	= Molybdenum
Ni	= Nikel
P	= Phospor
S	= Sulfur
Si	= Silicon
T	= Temperatur
t	= Waktu
Ti	= Titanium
V	= Vanadium

### Daftar Pustaka

- Aji, W. S., & Nugroho, S. (2014). Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox Pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (Krde). *Jurnal Teknik Mesin*, 2(4), 413–420.
- ASTM E 1417. (1999). *Standard Practice for liquid Penetrant Examination*.
- ASTM E 1999. (2018). *Standard Test Method for Analysis of Cast Iron by Spark Atomic Emission Spectrometry*.
- ASTM E 797. (2016). *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*.
- ASTM E 18. (2020). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- ASTM E 3-11. (2017). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.
- Henning, W.A., & Mercer, J. (1993). *Ductile Iron Book*. American Foundrymen's Society, Inc.
- Hwang, J. K. (2020). Thermal Behavior Of A Rod During Hot Shape Rolling And Its Comparison With A Plate During Flat Rolling. *Processes*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/pr8030327>
- Istiyono, E. (2009). Analisis Sifat Magnetik Bahan Yang Mengalami Proses Annealing Dan Quenching. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, Dan Penerapan*, 311–319.
- Sitompul, E. D., & Dharma, S. (2018). Pengaruh Variasi Konsentrasi Media Pendingin (*Quenchant*) Pada Proses *Quench Terhadap kekerasan, Struktur Mikro Dan Retak Akinat Quench (Quench Crack) Dari Baja AISI 1040*. 11(April), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.19184/rotor.v11i1.6003>
- Suratman, R., & Bandanadjaja, B. (2017). Analisis Perubahan Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Besi Cor Nodular 700 Setelah Mengalami Proses Perlakuan Panas. *Mesin*, 17(2), 44–50.
- Suripto, D. (2014). Analisa Kegagalan Pada Pipa Ulir di Lingkungan Perminyakan. *Jurnal Material Komponen dan Kontruksi*, 14(2), 26-34.
- Susanto, E. E. (2008). Kegagalan Komponen Dies Pada Proses Heat Treatment. *Jurnal Flywheel*, 1(Desember), 1–7.
- Sutowo, C., Kartika, I., & Priyono, B. (2015). Analisa Keretakan Pada Komponen Camshaft. *Prosiding Seminar Material Metalurgi 2015*.
- Sutowo, C., Senopati, G., Kartika, I., & Priyono, B. (2016). Analisa Kegagalan Retak Material Besi Cor Kelabu Untuk Aplikasi Cylinder Block. *Jurnal Teknik*, 1(November), 50–57.

# Perancangan Sistem Pengukuran, Pengendalian, dan Akuisisi Data Menggunakan Arduino dengan Antarmuka WinForms. Studi Kasus: Temperatur

Faiprianda Assyari Rahmatullah<sup>1</sup>, Rafly Yose Putra<sup>1</sup>, Muhammad Iwan Fermi<sup>1</sup>, dan Hari Ronaldo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

[faiprianda.assyari1319@student.unri.ac.id](mailto:faiprianda.assyari1319@student.unri.ac.id), [rafly.yose1459@student.unri.ac.id](mailto:rafly.yose1459@student.unri.ac.id), [miwanf@unri.ac.id](mailto:miwanf@unri.ac.id),

[hari.rionaldo@lecturer.unri.ac.id](mailto:hari.rionaldo@lecturer.unri.ac.id)

## Abstrak

Penelitian dilakukan untuk mengembangkan sistem akuisisi data dan kontrol menggunakan Arduino pada sistem operasi windows berbasis *Graphical User Interface* (GUI). Sistem akuisisi data dapat menyimpan data hasil pengukuran yang dapat digunakan untuk analisis terhadap sistem kontrol. Perangkat yang digunakan berupa mikrokontroler Arduino tipe Mega 2560 dan termokopel tipe K menggunakan *driver* MAX6675. GUI dibuat dengan bahasa program C# menggunakan aplikasi WinForms. Akuisisi data dilakukan menggunakan perangkat Arduino yang terhubung dengan komputer melalui koneksi USB. Sistem pengendalian bekerja dengan cara mengatur *water heater* yang terhubung ke *relay* oleh Arduino menggunakan nilai *setpoint* pada GUI. Sistem akuisisi data dan kontrol dirancang menggunakan mode kontrol PID dengan parameter  $K_p = 1,189159$ ,  $K_i = 2,038558$ , dan  $K_d = 0,173419$ . Berdasarkan hasil percobaan, mode kontrol PID memiliki nilai kesalahan terkecil yaitu sebesar 871,7 dengan metode IAE dan 402.457 menggunakan metode ITAE.

Kata kunci: akuisisi data, arduino, C#, PID controller, temperatur

## Abstract

Research was conducted to develop a data acquisition and control system using Arduino on a Windows operating system based on a Graphical User Interface (GUI). The data acquisition system can store measurement results data which can be used for analysis of the control system. The devices used are an Arduino type Mega 2560 microcontroller and a K type thermocouple using the MAX6675 driver. The GUI was created in the C# programming language using the WinForms application. Data acquisition is carried out using an Arduino device connected to a computer via a USB connection. The control system works by regulating the water heater connected to the relay by Arduino using the setpoint value on the GUI. The data acquisition and control system is designed using PID control mode with parameters  $K_p = 1.189159$ ,  $K_i = 2.038558$ , and  $K_d = 0.173419$ . Based on the experimental results, the PID control mode has the smallest error value, namely 871.7 using the IAE method and 402,457 using the ITAE method.

Keywords: data acquisition, arduino, C#, PID controller, temperature

## 1. Pendahuluan

Pada industri kimia, pengukuran dan pengendalian terhadap temperatur perlu dilakukan karena memiliki pengaruh yang besar terhadap sistem (Gasparec, 2013) dan menentukan keberhasilan suatu proses operasi (Ross-Pinnock, 2016), contohnya seperti *yield* pada reaksi kimia (Asl, 2018), reaksi pada reaktor (Affan, 2019), konversi pada proses fermentasi (Rivera, 2017), dan bioreaktor pada industri bio-proses (Kumar, 2019). Sistem pengukuran dan pengendalian yang telah umum digunakan pada industri adalah sistem berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*), DCS (*Distributed Control Systems*), dan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Sistem ini memiliki kerumitan pengoperasian dan biaya yang tinggi untuk industri skala kecil, sehingga diperlukan sistem yang berbiaya murah dan dapat dioperasikan dengan mudah (Mir & Swarnalatha, 2018).

Salah satu sistem pengukuran dan pengendalian berbiaya murah adalah dengan penggunaan Arduino. Arduino merupakan perangkat berbasis *open-source* yang memungkinkan untuk mereplikasi sistem kontrol pada industri dengan biaya yang lebih murah pada skala kecil (Mir & Swarnalatha, 2018). Arduino memiliki keandalan yang bagus, kekokohan, koneksi yang stabil, harga yang murah, dan dapat digunakan sebagai sistem kontrol dari berbagai level (Koestoer, 2018). Arduino dapat digunakan untuk mengontrol sensor, motor, dan berbagai tipe dari aktuator. Berdasarkan fungsi ini, beberapa studi telah menggunakan Arduino sebagai sistem akuisisi data dan kontrol (Suciyati, 2021).

### Info Makalah:

Dikirim : 12-13-22;

Revisi 1 : 07-16-23;

Revisi 2 : 08-10-23;

Diterima : 08-16-23.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 812-7535-803

e-mail : [miwanf@unri.ac.id](mailto:miwanf@unri.ac.id)

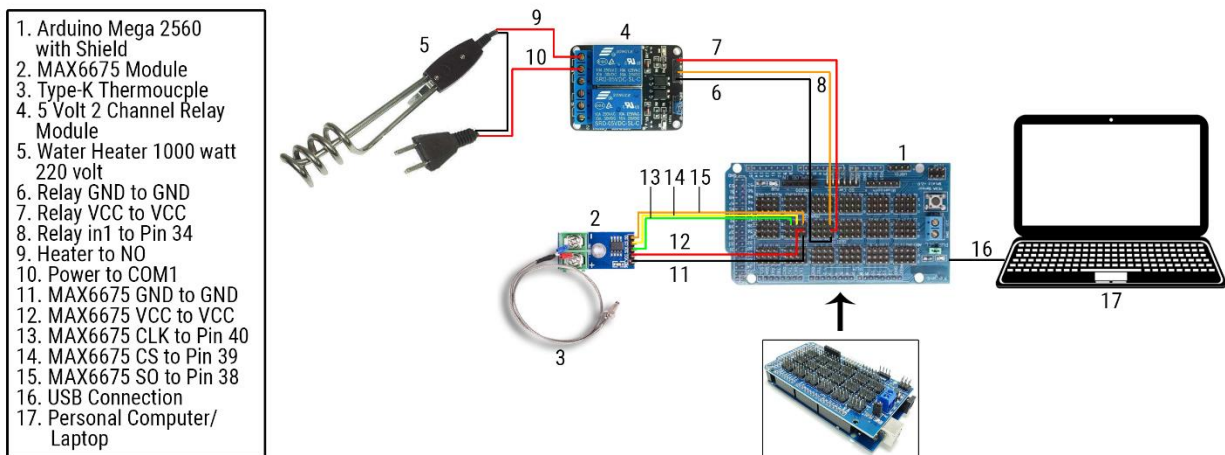
Camargo (2015) telah mengembangkan sistem pengukuran temperatur menggunakan Arduino, namun sistem ini belum berbasis GUI (*Graphical User Interface*) sehingga sulit untuk dioperasikan secara visual. Nurhalimah (2019) telah mengembangkan sistem pengukuran dan pengendalian temperatur berbasis GUI (*Graphical User Interface*), namun sistem ini hanya dapat berjalan pada sistem operasi Linux, yang mana sedikit sulit untuk dioperasikan dibandingkan dengan sistem operasi Windows.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengukuran dan pengendalian menggunakan Arduino tipe Mega 2560 dan sensor termokopel tipe K serta berbasis GUI (*Graphical User Interface*) yang berjalan pada sistem operasi Windows sehingga dapat dioperasikan dengan mudah. GUI (*Graphical User Interface*) dibuat menggunakan WinForms yang berbasis bahasa program C#. Sistem yang dikembangkan dapat diimplementasikan dalam skala kecil dan sebagai media pembelajaran. Sistem yang dihasilkan bersifat *open source* sehingga dapat dikembangkan secara kolaborasi.

## 2. Metode

### 2.1. Penyusunan Perangkat

Perangkat utama yang digunakan adalah mikrokontroler berupa Arduino tipe Mega 2560 dan sensor temperatur berupa termokopel tipe K dengan *driver* MAX6675. Arduino Mega 2560 dipilih karena memiliki memori yang besar sehingga dapat menampung banyak data percobaan, sedangkan sensor termokopel tipe K dipilih karena mudah untuk digunakan dan berbiaya murah. Perangkat tambahan yang digunakan adalah *Mega Shield V2.0* yang berfungsi untuk menghubungkan sensor temperatur ke Arduino, *Relay 2 Channel* yang berfungsi untuk mengendalikan pemanas air, dan unit EDIDON UPC sebagai sistem tangki. *Mega Shield V2.0* dipilih untuk membuat rangkaian menjadi lebih ringkas. *Relay 2 Channel* dipilih untuk mengendalikan pemanas air. Penyusunan perangkat ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



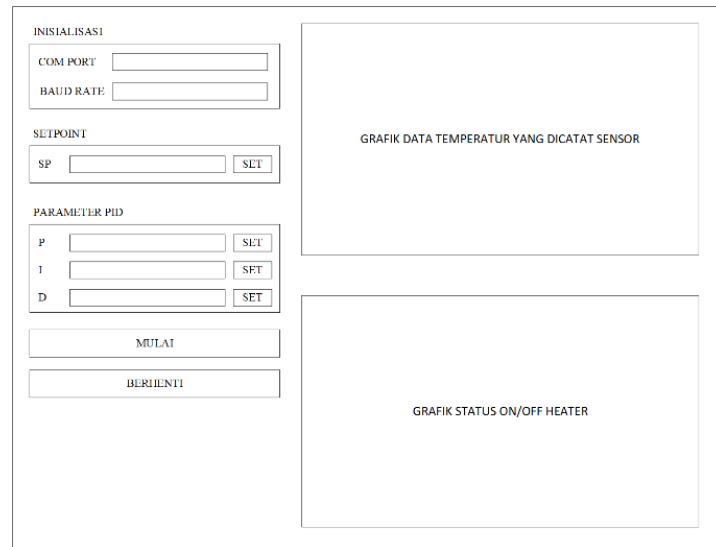
Gambar 1. Rangkaian Perangkat Akuisisi Data.

### 2.2. Uji Kinerja Alat

Sebelum percobaan dilakukan, dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk memastikan perangkat mikrokontroler dan sensor temperatur dapat berfungsi dan berjalan dengan baik. Pengujian dilakukan dengan cara mencelupkan sensor temperatur yaitu termokopel tipe K ke dalam air pada tangki pengamatan, kemudian mikrokontroler Arduino dihubungkan ke komputer melalui koneksi USB. Selanjutnya program Arduino untuk membaca temperatur dari sensor yang telah dibuat kemudian di-*upload* ke dalam *board* Arduino. Jika program Arduino dapat menampilkan hasil pembacaan temperatur dengan baik, maka sensor temperatur dapat dipastikan berfungsi. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memastikan keakuratan data.

### 2.3. Desain Perangkat Lunak

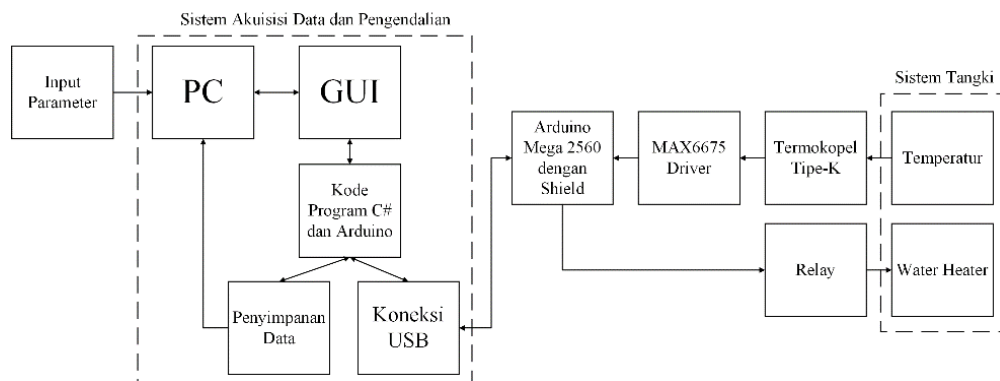
Perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak berbasis sumber terbuka yaitu bahasa program C#, WinForms, dan Arduino IDE. WinForms digunakan untuk membuat antarmuka pengguna atau GUI (*Graphical User Interface*) menggunakan bahasa program C#. GUI dibuat menggunakan modul atau *toolbox* yang telah disediakan oleh WinForms pada program Microsoft Visual Studio 2022. *Toolbox* pada WinForms memudahkan dalam pembuatan GUI sehingga tidak diperlukan untuk menulis kode program dari awal. GUI yang dibuat menggunakan WinForms akan menjalankan program akuisisi data dan menampilkannya dalam bentuk grafik secara *real-time*. Arduino IDE digunakan untuk menuliskan program yang akan diunggah pada *board* Arduino. Kode program Arduino bekerja dengan membaca data digital yang dikirimkan ke *board* Arduino dari *driver* MAX6675, di mana sebelumnya data masih berbentuk analog dari sensor temperatur. Desain perangkat lunak yang akan dibuat ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Rancangan Graphical User Interface.

## 2.4. Metode Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan dengan menghubungkan mikrokontroler Arduino yang telah disusun pada unit EDIBON UPC dengan komputer melalui koneksi USB. Sistem tangki pada EDIBON UPC kemudian diisi dengan air hingga batas ketinggian yang ditentukan. Sensor termokopel tipe K kemudian dicelupkan ke dalam air pada tangki. Program yang telah dibuat pada Arduino IDE dan aplikasi WinForms kemudian dijalankan pada komputer untuk memulai akuisisi data. *Relay* yang terhubung dengan mikrokontroler kemudian menghidupkan *water heater* sampai batas pembacaan temperatur yang ditentukan pada GUI. Setelah mencapai batas nilai pembacaan, *relay* kemudian akan mematikan *water heater*. Percobaan dilakukan selama 6 menit untuk setiap *set point*. Setelah percobaan selesai dilakukan, data yang didapatkan dari hasil akuisisi kemudian disimpan ke dalam komputer. Skema dari percobaan ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Skema Proses Akuisisi Data

Sistem kontrol yang diterapkan pada percobaan menggunakan metode *PID Controller*. Sebelum menerapkan metode kontrol PID, terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai parameter PID. Perhitungan untuk menentukan nilai parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan *Process Reaction Curve*. Setelah didapatkan nilai *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative* dari hasil perhitungan, nilai tersebut kemudian diinput ke dalam GUI. *Relay* kemudian akan membaca perintah dari Arduino dan mengatur waktu hidup-mati berdasarkan nilai parameter PID dan nilai batas pembacaan temperatur pada GUI.

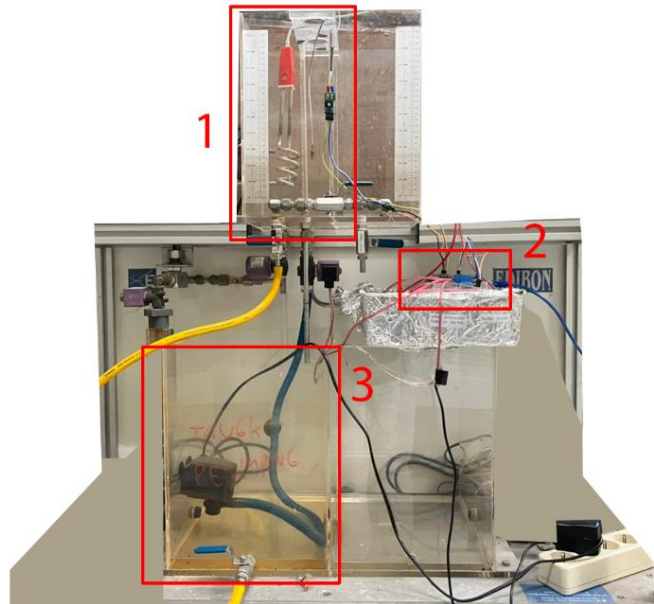
## 2.5. Perhitungan Error dan Evaluasi Performa

Data yang diperoleh dari program akuisisi data akan di komparasi terhadap masing-masing metode kontrol. Komparasi dilakukan dengan melakukan *plotting* dan melihat kurva respon yang dihasilkan dari metode yang digunakan. Selain komparasi menggunakan kurva respon, juga dilakukan komparasi dengan uji respon menggunakan kriteria *Integral Absolute Error (IAE)* dan *Integral Time Absolute Error (ITAE)*. Berdasarkan hasil dari komparasi ini akan didapatkan metode yang tepat untuk digunakan terhadap sistem.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Rangkaian Sistem Kontrol Temperatur

Sistem kontrol temperatur yang dibangun terdiri dari (1) tangki percobaan, (2) perangkat akuisisi data, dan (3) tangki reservoir. Tangki percobaan digunakan sebagai tempat untuk melakukan percobaan akuisisi data, tangki reservoir digunakan untuk menampung air segar sebelum dipompakan ke tangki percobaan, perangkat akuisisi data digunakan untuk melakukan pengambilan data temperatur dan mengendalikan pemanas elektrik. Sistem yang telah dibangun dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Sistem Kontrol yang Telah Dibangun.

#### 3.2. Pemodelan Sistem Kontrol Temperatur

Model matematika dari sistem kontrol temperatur didapatkan dengan menurunkan persamaan neraca massa dan energi dari sistem secara keseluruhan. Dalam menyusun model matematika dari sistem, menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Densitas ( $\rho$ ) dan kapasitas panas ( $C_p$ ) dari fluida yang digunakan, dalam penelitian ini menggunakan air mineral, dianggap konstan
2. Ketinggian fluida ( $h$ ) di dalam tangki dianggap konstan
3. Volume ( $V$ ) dari tangki dianggap konstan
4. Temperatur dai aliran inlet ( $T_i$ ) dianggap konstan
5. Panas yang hilang ke lingkungan diabaikan

Penurunan persamaan neraca massa dan energi dari sistem menghasilkan (Coughanowr & Leblanc, 2009):

$$q + F \cdot C_p \cdot \rho(T_i) - F \cdot C_p \cdot \rho(T) = \rho \cdot C_p \cdot V \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Pada keadaan *steady state*,  $\frac{dT}{dt}$  bernilai nol, sehingga persamaan (1) dapat ditulis menjadi

$$q_s + F \cdot C_p \cdot \rho(T_{i_s}) - F \cdot C_p \cdot \rho(T_s) = 0 \quad (2)$$

di mana huruf s digunakan untuk menyatakan keadaan *steady state*.

Pengurangan persamaan (2) dengan persamaan (1) menghasilkan

$$q - q_s + F \cdot C_p \cdot \rho[(T_i - T_{i_s}) - (T - T_s)] = \rho \cdot C_p \cdot V \frac{d(T - T_s)}{dt} \quad (3)$$

Dengan memperkenalkan variabel deviasi

$$T'_i = T_i - T_{i_s} \quad (4)$$

$$Q = q - q_s \quad (5)$$

$$T' = T - T_s \quad (6)$$

Persamaan (3) menjadi

$$Q + F \cdot Cp \cdot \rho (T'_i - T') = \rho \cdot Cp \cdot V \frac{dT'}{dt} \quad (7)$$

Dengan melakukan transformasi Laplace pada persamaan (7) didapatkan

$$Q(s) + F \cdot Cp \cdot \rho [T'_i(s) - T'(s)] = \rho \cdot Cp \cdot Vs \cdot T'(s) \quad (8)$$

atau

$$T'(s) \left( \frac{\rho \cdot V}{F} s + 1 \right) = \frac{Q(s)}{F \cdot Cp \cdot \rho} + T'_i(s) \quad (9)$$

Persamaan (9) dapat ditulis menjadi

$$T'(s) = \frac{1}{\frac{F \cdot Cp \cdot \rho}{\tau s} + 1} Q(s) + \frac{1}{\tau s + 1} T'_i(s) \quad (10)$$

Dengan asumsi  $T_i$  konstan, sehingga nilai  $T'_i(t) = 0$  dan perubahan hanya terjadi pada  $Q(t)$ , fungsi transfer dengan hubungan  $T'$  dan  $Q$  adalah

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (11)$$

Di mana

$$\tau = \frac{\rho \cdot V}{F} = \frac{kg}{kg/minmin}$$

dan *gain* untuk  $Q(t)$  adalah

$$\frac{1}{F \cdot Cp \cdot \rho} = \frac{1}{\left( \frac{L}{min} \right) \left( \frac{kg}{L} \right) \left( \frac{kJ}{kg^\circ C} \right) \left( \frac{1min}{60s} \right)} = \frac{^\circ C}{kJ/s} = \frac{^\circ C}{kW}$$

Persamaan (11) memberikan fungsi transfer dari sistem kontrol temperatur yang menunjukkan hubungan antara daya dari pemanas elektrik dan temperatur keluaran dari tangki, yaitu  $T'(s)$  sebagai *output* temperatur dari tangki dan  $Q(s)$  sebagai input dari pemanas elektrik. Dimana input dari pemanas elektrik dapat menyebabkan perubahan pada *output* temperatur dari tangki.

Setelah didapatkan bentuk dari fungsi transfer pada persamaan (11), selanjutnya dilakukan input variabel ke dalam fungsi transfer untuk mendapatkan model persamaan fungsi transfer teoritis. Variabel yang akan diinput tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel untuk Persamaan Teoritis.

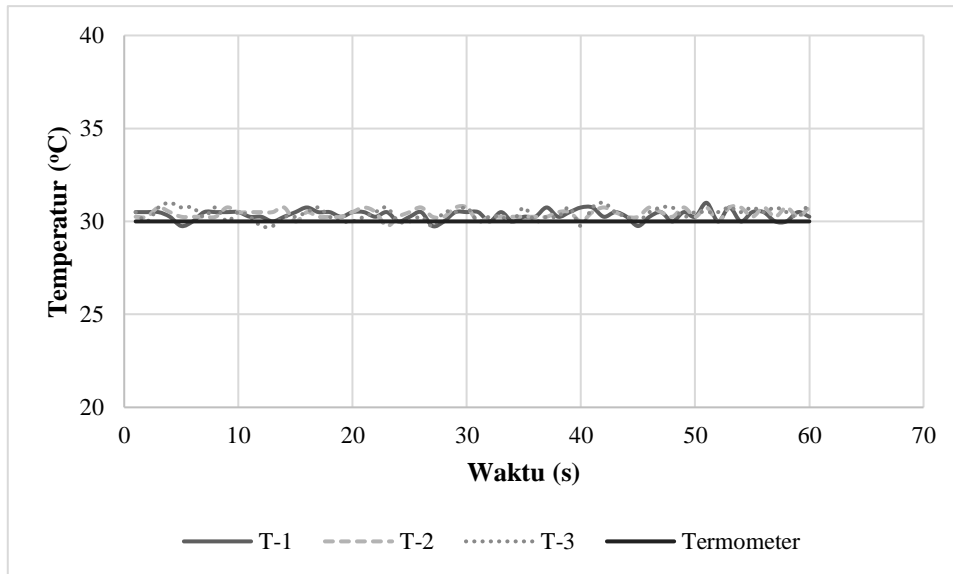
Variabel	Nilai	Satuan
Laju Alir Air ( $F$ )	1,332	L/min
Kapasitas Panas Air ( $Cp$ )	4,184	kJ/kg $^\circ$ C
Densitas Air ( $\rho$ )	0,997	kg/L
Volume Tangki ( $V$ )	8,96	L

Berdasarkan variabel pada Tabel 1, didapatkan bentuk fungsi transfer proses dengan gain proses sebesar 10,753 $^\circ$ C/kW dan waktu konstan sebesar 6,735 menit. Bentuk persamaan fungsi transfer ditunjukkan pada persamaan (12).

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{10,753}{6,735s + 1} \quad (12)$$

### 3.3. Uji Kerja Sensor Termokopel

Uji kerja dilakukan untuk memastikan perangkat Arduino dan sensor termokopel dapat bekerja dengan baik. Uji dilakukan dengan melakukan pengukuran temperatur selama 1 menit sebanyak 3 kali. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran pada termometer raksa. Hasil pengukuran pada sensor termokopel tertera pada Gambar 5.

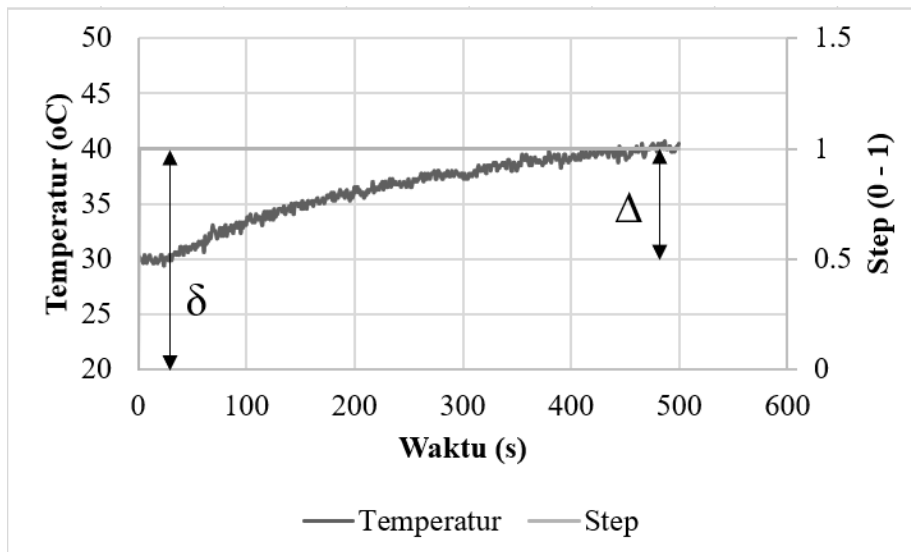


Gambar 5. Uji Kerja Sensor Termokopel dengan Tiga Kali Pengukuran.

Berdasarkan hasil *plotting* dari Gambar 5 menggunakan Microsoft Excel, didapatkan besaran *error* rata-rata sebesar 1,35°C. *Error* yang diperoleh masih berada di bawah batas *error* dari sensor termokopel tipe K, yaitu 1,5°C. Sehingga sensor termokopel tipe K dapat digunakan.

### 3.4. Menentukan Fungsi Transfer dari Kurva Reaksi

Fungsi transfer dari sistem keseluruhan didapatkan dari kurva respon hasil percobaan setelah mencapai keadaan *steady-state*. Temperatur mula-mula air pada tangki sebesar 30°C. Sistem kemudian diatur hingga mencapai keadaan *steady-state* dengan menjaga ketinggian air di dalam tangki dan memanaskan air hingga suhu pengukuran menjadi konstan. Hasil pengukuran untuk kurva reaksi tertera pada Gambar 6.



Gambar 6. *Plotting* Hasil Pengukuran untuk Kurva Reaksi.

Dari Gambar 6, kemudian ditentukan persamaan fungsi transfer proses menggunakan metode *Process Reaction Curve*. Perhitungan fungsi transfer proses dengan metode *Process Reaction Curve* menggunakan parameter sebagai berikut (Kholis, 2017):

$$\Delta = \text{Nilai Akhir} - \text{Nilai Awal} \tag{13}$$

$$\delta = \text{Step} \tag{14}$$

$$\text{Nilai 63\%} = \text{Nilai Awal} + (\Delta \cdot 63\%) \tag{15}$$

$$\text{Nilai } 28\% = \text{Nilai Awal} + (\Delta \cdot 28\%) \quad (16)$$

$$\tau = 1.5(t \text{ pada } 63\% - t \text{ pada } 28\%) \quad (17)$$

$$\theta = t \text{ pada } 63\% - \tau \quad (18)$$

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} \quad (19)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (20)$$

Dengan menggunakan persamaan (13) sampai persamaan (20), didapatkan data untuk menentukan fungsi transfer proses yang tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Perhitungan *Process Reaction Curve* dari Gambar 2.

Variabel	Nilai
$\Delta$	10,12
Nilai 63%	36,24
Nilai 28%	32,7
t pada 63%	3,22
t pada 28%	1,27
$\tau$	2,925
$\theta$	0,292
$K_p$	10,12

Berdasarkan data pada Tabel 2, didapatkan bentuk fungsi transfer proses dengan gain proses sebesar 10,12°C/kW dan waktu konstan sebesar 2,925 menit. Bentuk persamaan fungsi transfer proses ditunjukkan pada persamaan (21).

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{10,12}{2,925s + 1} e^{-0,292s} \quad (21)$$

Hasil perhitungan fungsi transfer teoritis dan eksperimental ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Model Fungsi Transfer Temperatur.

Parameter	Teoritis	Eksperimental
$K_p$ (°C/KW)	10,753	10,12
$\tau_d$ (min)	-	0,292
$\tau$ (min)	6,753	2,925

### 3.5. Menghitung Parameter PID

Perhitungan parameter  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  yang digunakan pada sistem dihitung menggunakan metode Ziegler-Nichols yaitu metode *Process Reaction Curve*. Pada metode ini, parameter PID dihitung menggunakan rumus yang tertera pada Tabel 4 (Xue et al., 2007).

Tabel 4. Formula Metode Ziegler-Nichols.

Controller Type	From step response		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	1/a		
PI	0.9/a	3L	
PID	1,2/a	2L	L/2

Perhitungan parameter nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. Hasil perhitungan pada program Scilab tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  Hasil Perhitungan.

Metode Kontrol	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0,990966	-	-
PI	0,891869	0,875	-
PID	1,189159	0,583333	0,145833

Berdasarkan nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  yang telah didapatkan, kemudian dapat diperoleh nilai *Proportional Gain*, *Integral Gain*, dan *Derivative Gain*. Ketiga nilai tersebut tertera pada Tabel 6.

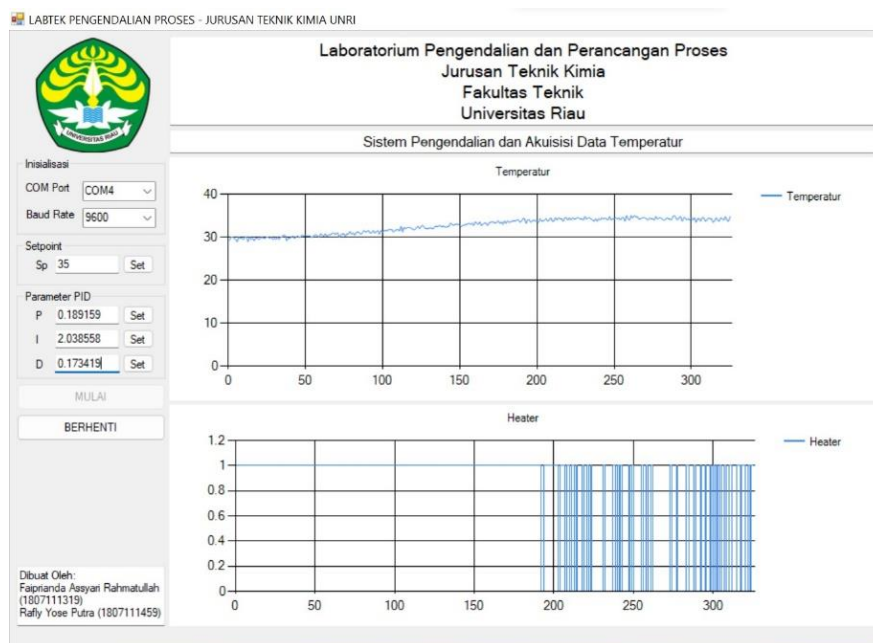


Tabel 6. Nilai *Proportional Gain*, *Integral Gain*, dan *Derivative Gain*

Metode Kontrol	Proportional Gain (Kp)	Integral Gain (Ki)	Derivative Gain (Kd)
P	0,990966	-	-
PI	0,891869	1,019279	-
PID	1,189159	2,038558	0,173419

### 3.6. Antarmuka Aplikasi (GUI)

Antarmuka aplikasi yang telah dibuat menggunakan WinForms terdiri dari inisialisasi, pengaturan kendali, dan daerah *plotting*. Bagian inisialisasi terdiri dari COM Port dan Baud Rate untuk mengatur koneksi Arduino ke Laptop. Nilai COM merupakan angka yang menunjukkan *port* USB pada Laptop yang terkoneksi dengan Arduino, sedangkan nilai *Baud Rate* merupakan nilai standar untuk melakukan pengiriman data dari Arduino ke Laptop dan sebaliknya. Bagian pengaturan kendali terdiri dari input *setpoint* dan input parameter PID. Input *setpoint* berfungsi untuk mengatur *setpoint* yang akan diterapkan pada sistem, dalam hal ini diisi dengan nilai temperatur dalam satuan °C. Input parameter PID berfungsi untuk menginput konstanta P, I, dan D untuk diterapkan ke dalam sistem. Daerah *plotting* berfungsi untuk menampilkan hasil pengukuran temperatur terhadap waktu dan respon step dari *relay* yang ditandai dengan nilai 0 dan 1. Tampilan dari Antarmuka aplikasi tertera pada Gambar 7.



Gambar 7. Tampilan Antarmuka Aplikasi Sistem Pengendalian Temperatur.

### 3.7. Uji Respon Sistem terhadap Perubahan *Setpoint*

Uji respon dilakukan dengan memberikan gangguan pada sistem. Gangguan dimaksudkan untuk melihat respon sistem apabila terjadi perubahan pada *setpoint* yang ditentukan. Perubahan *setpoint* dilakukan setelah sistem pengendalian telah mencapai kestabilan terhadap *setpoint* (Suprpto et al., 2013). Pada uji respon ini, perubahan nilai *setpoint* dibuat pada rentang nilai [37°C-42°C-37°C]. Setelah melakukan uji respon, data kemudian disimpan dalam format file CSV. File CSV kemudian diimpor ke dalam program Scilab untuk membandingkan respon dari sistem kontrol.

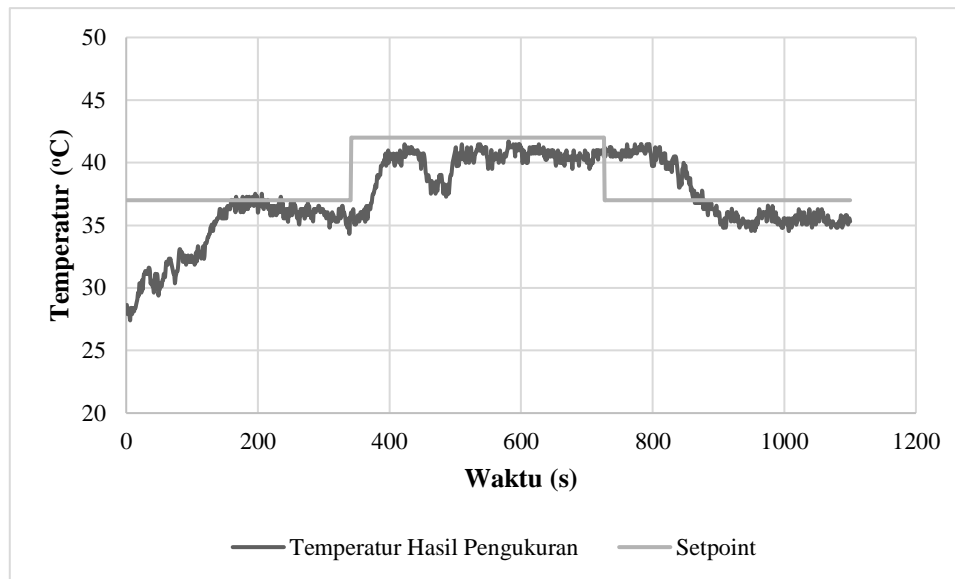
Kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi sistem pada penelitian ini adalah *Integral Absolute Error* (IAE) dan *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang dirumuskan sebagai berikut (Coughanowr & Leblanc, 2009):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (22)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e| t dt \quad (23)$$

Menurut Mahmood et al. (2018), semakin kecil nilai *error* yang diperoleh, maka semakin baik performa metode kontrol tersebut.

Berdasarkan hasil percobaan menggunakan metode kendali PI, didapatkan respon sistem dalam bentuk grafik yang tertera pada Gambar 8.



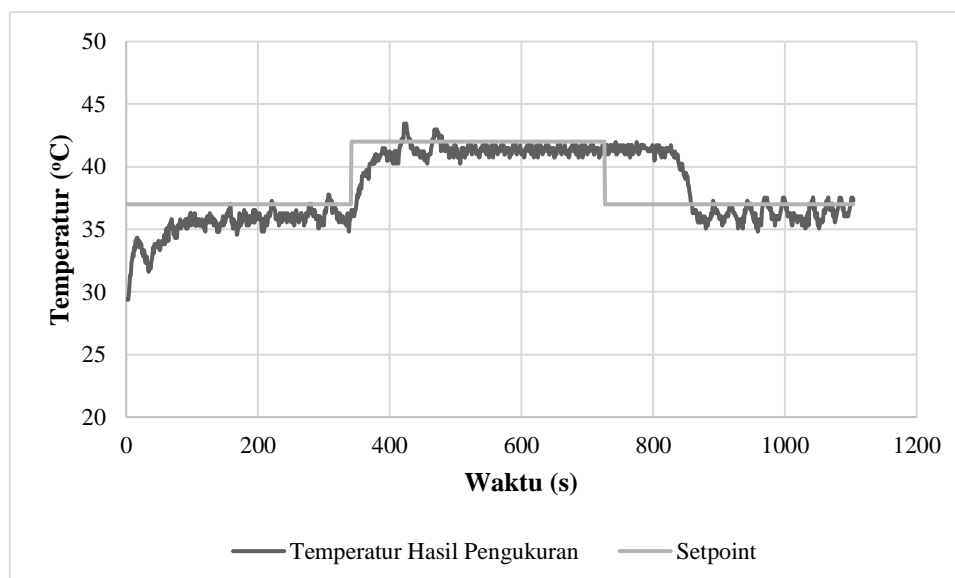
Gambar 8. Respon Sistem pada Metode Kendali PI.

Berdasarkan Gambar 7, terdapat tiga periode pada respon sistem, yaitu periode *startup*, perubahan *setpoint I*, dan perubahan *setpoint II*. Pada periode *startup*, *setpoint* diatur pada 37°C kemudian dipertahankan kestabilannya. Pada periode perubahan *setpoint I*, ditambahkan gangguan pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 37°C menjadi 42°C. Pada periode perubahan *setpoint II*, ditambahkan gangguan kembali pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 42°C menjadi 37°C. *Error* dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. *Error* pada metode kendali PI pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung tertera pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai *error* pada Metode Kendali PI

Periode	IAE	ITAE
<i>Startup</i>	967,53	2,5514e+05
Perubahan <i>Setpoint I</i>	4,9828e+03	2,4841e+06
Perubahan <i>Setpoint II</i>	385,71	3,8655e+05

Berdasarkan hasil percobaan menggunakan metode kendali PID, didapatkan respon sistem dalam bentuk grafik yang tertera pada Gambar 9.



Gambar 9. Respon Sistem pada Metode Kendali PID.

Berdasarkan Gambar 8, terdapat tiga periode pada respon sistem, yaitu periode *startup*, perubahan *setpoint I*, dan perubahan *setpoint II*. Pada periode *startup*, *setpoint* diatur pada 37°C kemudian dipertahankan kestabilannya. Pada periode perubahan *setpoint I*, ditambahkan gangguan pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 37°C menjadi 42°C. Pada periode perubahan *setpoint II*, ditambahkan gangguan kembali pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 42°C

menjadi 37°C. *Error* dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. *Error* pada metode kendali PI pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung tertera pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai *Error* pada Metode Kendali PID.

Periode	IAE	ITAE
<i>Startup</i>	929	2,317e+05
Perubahan <i>Setpoint I</i>	1,2801e+03	5,9517e+05
Perubahan <i>Setpoint II</i>	406	3,8501e+05

*Error* pada metode kendali PI dan PID pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai *Error* pada Metode Kontrol PI dan PID.

Metode Kontrol	Periode	IAE	ITAE
PI ( <i>Proportional-Integral</i> )	<i>Startup</i>	967,53	2,5514e+05
	Perubahan <i>Setpoint I</i>	4,9828e+03	2,4841e+06
	Perubahan <i>Setpoint II</i>	385,71	3,8655e+05
	Rata-rata	2112,013	1.041.930
PID ( <i>Proportional-Integral-Derivative</i> )	<i>Startup</i>	929	2,317e+05
	Perubahan <i>Setpoint I</i>	1,2801e+03	5,9517e+05
	Perubahan <i>Setpoint II</i>	406	3,80501e+05
	Rata-rata	871,7	402.457

Berdasarkan nilai IAE dan ITAE yang telah didapatkan dari kedua metode kontrol, diketahui bahwa nilai IAE dan ITAE metode kontrol PID lebih kecil daripada metode kontrol PI, yang menunjukkan bahwa metode kontrol PID memiliki performa yang lebih baik daripada metode kontrol PI untuk sistem kontrol temperatur.

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa sistem pengukuran dan pengendalian temperatur berbasis Arduino dapat berjalan dan memiliki performa cukup baik pada metode kontrol PID dengan parameter  $K_p = 1,189159$ ;  $K_i = 2,038558$ ;  $K_d = 0,173419$  dengan nilai *error* sebesar 929; 1,2801e+03; 406 menggunakan IAE dan 2,317e+05; 5,9517e+05; 3,80501e+05 menggunakan ITAE. Antarmuka yang dibuat memiliki fitur untuk memasukkan nilai *set point* dan parameter PID sehingga memudahkan dalam pengoperasian. Antarmuka juga memiliki fitur *live plotting* sehingga pengguna dapat langsung mengamati respon dari sistem kendali. Data hasil pengukuran dapat disimpan dalam format CSV untuk pengolahan lebih lanjut.

### Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode *tuning* Cohen-Coon agar didapatkan parameter sistem pengendalian yang lebih optimal dibandingkan dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.

### Daftar Notasi

- $q$  = Laju Panas [kJ/h]
- $F$  = Laju Alir Air [L/min]
- $C_p$  = Kapasitas Panas Air [kJ/kg°C]
- $\rho$  = Densitas Air [kg/L]
- $T$  = Temperatur
- $V$  = Volume Tangki [L]
- $T$  = Waktu Konstan [min]

### Daftar Pustaka

- Affan, F. B. (2019). Temperature Sensors Development in the Chemical Industries. *Journal of Alternative and Renewable Energy Sources*, 5(3), 39-43.
- Asl, S. M. H., Ghadi, A., Baei, M. S., Javadian, H., Maghsudi, M., & Kazemian, H. (2018). Porous Catalysts Fabricated from Coal Fly Ash as Cost-effective Alternatives for Industrial Applications: A Review. *Fuel*, 217, 320-342.
- Camargo, T. F., Prado, C. T., Coutinho, M. R., Higa, M., Conceição, W. A. dos S., & Andrade, C. M. G. (2015). Use of Scilab and Arduino for Data Acquisition Environmental. *IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 417-421.
- Coughanowr, D. R., & Leblanc, S. E. (2009). *Process Systems Analysis and Control* (Third Edit). McGraw-Hill.
- Gasparesc, G. (2013). Development of a Low-cost System for Temperature Monitoring. *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2013*, 340-343.

- Karami, M., McMorrow, G. V., & Wang, L. (2018). Continuous Monitoring of Indoor Environmental Quality using and Arduino-based Data Acquisition System. *Journal of Building Engineering*, 19, 412-419.
- Koestoer, R. A., Saleh, Y. A., & Harinaldi, I. R. (2019). A Simple Method for Calibration of Temperature Sensor DS18B20 Waterproof in Oil Bath Based on Arduino Data Acquisition System. *The 10<sup>th</sup> International Meeting of Advances in Thermofluids*, 1-8.
- Kumar, M., Prasad, D., Giri, B. S., & Singh, R. S. (2019). Temperature Control of Fermentation Bioreactor for Ethanol Production using IMC-PID Controller. *Biotechnology Reports*, 22, e00319.
- Mahmood, Q. A., Nawaf, A. T., Esmael, M. N., & Abdulateef, L. T. (2018). PID Temperature Control of Demineralized Water Tank. *International Conference on Materials Engineering and Science 454 01231*.
- Mir, A., & Swarnalatha, R. (2018). Implementation of an Industrial Automation System Model using an Arduino. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(12), 4131-4144.
- Nurhalimah, D., & Fermi, M. I. (2019). Pembuatan Sistem Akuisisi Data Sederhana Menggunakan Arduino-Python (Studi Kasus : Suhu Fluida pada Tangki Pemanas). *JOM FTEKNIK*, 6(2), 1-8.
- Rivera, E. C., Yamakawa, C. K., Saad, M. B. W., Atala, D. I. P., Ambrosio, W. B., Bonomi, A., Junior, J., & Rossell, C. E. V. (2017). Effect of Temperature on Sugarcane Ethanol Fermentation: Kinetic Modeling and Validation under Very-high-gravity Fermentation Conditions. *Biochemical Engineering Journal*, 119, 42-51.
- Ross-Pinnock, D., & Maropoulos, P. G. (2016). Review of Industrial Temperature Measurement Technologies and Research Priorities for the Thermal Characterisation of the Factories of the Future. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(5), 793-806.
- Suciyati, S. W., Hidayatullah, M. S., & Pauzi, G. A. (2021). An Analysis of Data Acquisition System of Temperature, Oxygen, and Carbon Dioxide in Refrigerator with Arduino Mega 2560. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-BiRuNi*, 10(1), 119-127.

## Studi Kejenuhan pada *Current Transformer* (CT) Akibat Arus Hubung Singkat

Giri Angga Setia<sup>1</sup>, Een Taryana<sup>1</sup>, Naufal Nur Aiman<sup>1</sup>, Ahmad Daelami<sup>1</sup>, dan Hikmah Prasetia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

<sup>2</sup>PT PLN (Persero) Perencanaan Strategis Transmisi, Jakarta, Indonesia

[giri.anggasetia@gmail.com](mailto:giri.anggasetia@gmail.com), [eentaryana96@gmail.com](mailto:eentaryana96@gmail.com), [naufalnuraiman98@gmail.com](mailto:naufalnuraiman98@gmail.com),

[ahmad.daelami@lecture.unjani.ac.id](mailto:ahmad.daelami@lecture.unjani.ac.id), [hikmah.p@pln.co.id](mailto:hikmah.p@pln.co.id)

### Abstrak

Model pendekatan analisis saturasi CT dilakukan dengan menggunakan simulasi software ATPDraw dan Mathcad. Input data simulasi diperoleh dari pengujian CT pada GI Priok Barat yaitu rasio, kurva eksitasi V-rms-Irms, Rct. Berdasarkan hasil simulasi, bahwa model CT berhasil diimplementasikan terhadap kondisi CT di GI Priok Barat yang mengalami kejenuhan, terlihat dari hasil bentuk gelombang yang mengalami distorsi dan nilai THDi sebesar 40,612%. Hasil ini selanjutnya dibandingkan dengan standar IEC 61869-2 dengan parameter yang didapat dari pengujian CT-Analyzer terhadap  $\epsilon$ -t, Ek, Ie, Kx, dan Rct, bahwa  $\epsilon$ -t sebesar -1%, Ek sebesar 635,25 V, Ie sebesar 13,5 mA, Kx sebesar 0,084 dan Rct 7432,57  $\Omega$ . Hasil ini mengalami penyimpangan dari standar yang ditentukan artinya CT tersebut mengalami kerusakan dan kejenuhan. Setelah dilakukan penggantian CT, diuji kembali dan didapatkan nilai  $\epsilon$ -t sebesar -0,010%, Ek sebesar 936,09 V, Ie sebesar 9,68 mA, Kx sebesar 14,39 A, Rct sebesar 4,226  $\Omega$ , serta hasil simulasi bentuk gelombang tidak mengalami distorsi, kemudian nilai THDi didapat sebesar 0,08%. Hal ini menunjukkan bahwa CT dalam keadaan baik dan tidak mengalami kejenuhan ketika nilai arus hubung singkat sebesar 20 kA.

Kata kunci: ATPDraw, kejenuhan, Mathcad, transformator arus

### Abstract

The CT saturation analysis approach model was carried out using ATPDraw and Mathcad software simulations. Input simulation data obtained from CT testing at West Priok Substation, namely ratio, excitation curve V-rms-Irms, Rct. Based on the simulation results, the CT model was successfully implemented for CT conditions at the West Priok Substation which experienced saturation, as seen from the results of the distorted waveforms and the THDi value of 40.612%. These results are then compared with the IEC 61869-2 standard with the parameters obtained from the CT-Analyzer test on  $\epsilon$ -t, Ek, Ie, Kx, and Rct, that  $\epsilon$ -t is -1%, Ek is 635.25 V, Ie is 13.5 mA, Kx of 0.084 and Rct of 7432.57  $\Omega$ . This result is a deviation from the specified standard, meaning that the CT is damaged and saturated. After replacing the CT, it was tested again and the value of  $\epsilon$ -t was -0.010%, Ek was 936.09 V, Ie was 9.68 mA, Kx was 14.39 A, Rct was 4.226  $\Omega$ , and the waveform simulation results were not distorted, then the THDi value obtained by 0.08%. This indicates that the CT is in good condition and does not experience saturation when the short circuit current is 20 kA.

Keywords: ATPDraw, saturate, Mathcad, current transformer

## 1. Pendahuluan

Listrik adalah suatu energi yang keberadaannya sangat dibutuhkan oleh manusia sehingga dalam penyaluran energinya, listrik harus mampu menyalurkannya secara kontinu. Listrik merupakan salah satu kebutuhan yang paling penting untuk menunjang kehidupan manusia saat ini dalam memenuhi kebutuhan sehari-hari. Secara umum dapat dikatakan bahwa energi listrik pada zaman ini tergolong kebutuhan primer, dimana energi listrik menjadi salah satu energi yang dapat mempermudah pekerjaan manusia. Oleh karenanya dalam menyalurkan energi listrik harus memenuhi 3 hal penting, yaitu keandalan (*reliability*), kualitas (*quality*) dan stabilitas (*stability*) (Setia et al., 2016) (BPPT, 2019).

Keandalan merupakan kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus, kualitas merupakan kemampuan sistem untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi, serta stabilitas merupakan kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami gangguan (Biswal & Biswal, 2019) (Biswal & Biswal, 2019). Namun dibalik semua hal itu gangguan sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan merupakan suatu ketidaknormalan pada sistem tenaga listrik dimana timbulnya

#### Info Makalah:

Dikirim : 07-06-23;

Revisi 1 : 08-07-23;

Diterima : 08-16-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 856-6556-649

e-mail : [giri.anggasetia@gmail.com](mailto:giri.anggasetia@gmail.com)

ketidaknormalan ini menjadikan penyaluran tenaga listrik menjadi terhambat yang juga nantinya akan merusak pada peralatan sistem tenaga listrik. Sehingga ketidaknormalan gangguan ini perlu di minimalisir kemunculannya (Marwan et al., 2016)(Zhao et al., 2023).

Sistem proteksi mempunyai peranan dalam meminimalisir gangguan pada sistem tenaga listrik (Seo & Gwon, 2019). Salah satu komponen dalam sistem proteksi adalah transformator arus. Transformator arus merupakan peralatan

yang merubah arus yang nilainya besar pada sisi primer menjadi arus yang nilainya kecil pada sisi sekunder, sehingga bisa digunakan sebagai masukan relai (Herlender et al., 2020). Pada saat munculnya gangguan arus hubung singkat, muncul arus yang sangat besar pada sisi primer transformator, transformator arus harus mampu mendeteksi arus yang sangat besar tersebut dimana dalam keadaan seperti ini transformator arus tidak diperbolehkan mengalami kejenuhan (Hasanah et al., 2019) (Ilyas & Agassy, 2021). Ketika kejenuhan terjadi maka arus pada sisi sekunder transformator nilainya akan menjadi sangat kecil, ketika hal ini terjadi transformator arus yang seharusnya memberikan masukan arus yang bernilai sesuai rating kerjanya terhadap relai namun memberikan masukan arus yang bernilai dibawah rating kerjanya relai, sehingga relai yang seharusnya bekerja ketika mendeteksi arus yang sangat besar setelah mendapatkan sinyal masukan dari transformator arus justru relai tidak akan bekerja ketika mendeteksi arus yang sangat besar setelah mendapatkan sinyal masukan dari transformator arus atau dengan kata lain relai mengalami malfungsi (Wen et al., 2021) (Transformers—Part, 1996) (IEC 61869-2, 2012).

Penelitian tentang evaluasi transformator arus perlu dilakukan pada GI priok barat mengingat sering terjadinya sambaran petir yang mengakibatkan DS pada GI priok barat mengalami open. Transformator arus salah satunya berfungsi sebagai konversi besaran arus, arus yang telah dikonversi dijadikan sebagai masukan terhadap relai-relai dan pms yang terhubung pada sisi sekunder CT. Apabila CT mengalami kejenuhan maka CT tidak akan bisa bekerja untuk mengkonversi besaran arus sesuai dengan rasionya (Kanokbannakorn & Penthong, 2019). Maka diperlukan analisis pemodelan terhadap performa transformator arus pada GI priok barat mengingat CT merupakan sebagai sensor dalam memberi perintah pada relai dan pms yang terhubung (Naseri et al., 2019) (Education, 2021).

Penelitian tentang studi model digital transformator arus untuk analisis unjuk kerja transien relai proteksi. Evaluasi eksperimental dari model CT diimplementasikan menggunakan EMTP, dimana model yang dikembangkan pada program EMTP memberikan hasil yang sangat memuaskan untuk sebagian besar kasus (Ahamed & Rao, 2015)(Syahputra, 2015). Salah satu perangkat lunak yang cukup populer dalam bidang sistem tenaga listrik adalah Electromagnetic Transients Program (ATP) yang merupakan versi dari EMTP adalah alat yang mampu digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja transformator arus (Afonso et al., 2020a)(Afonso et al., 2020b)(Georgiev et al., 2021).

Berdasarkan latar belakang masalah, dibutuhkan suatu analisis kejenuhan transformator arus terhadap gangguan arus hubung singkat. Analisis yang dilakukan menggunakan pendekatan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak ATPDraw sebagai representasi model transformator arus dan perangkat lunak MATHCAD sebagai perhitungan nilai-nilai paramater yang dibutuhkan dalam memodelkan transformator arus.

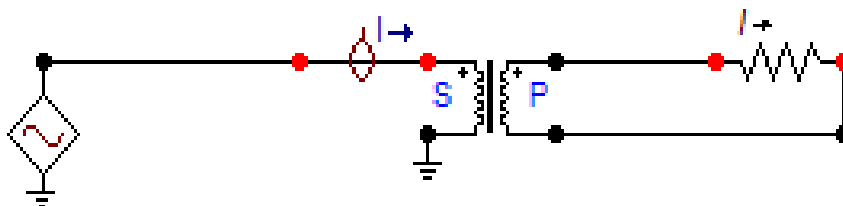
## 2. Metode

Untuk metode analisis dan pemodelan analisis kinerja *current transformer* terhadap arus hubung singkat dimodelkan menggunakan ATPDraw, dari pemodelan tersebut memiliki beberapa tahap dalam melakukan pemodelan. Tahapan pemodelan yang dilakukan diawali dengan melakukan pengumpulan data berupa hasil pengujian OMICRON CT ANALYZER yaitu berupa rasio CT, resistansi belitan sekunder, resistansi beban, kurva eksitasi Vrms-Irms dan karakteristik CT GI priok barat. Simulasi dengan memodelkan CT yang dipakai pada GI Priok Barat, dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATPDraw, pemodelan dilakukan dengan memasukkan data yang telah diperoleh sebelumnya. Kondisi CT terhadap arus hubung singkat dan resistansi beban dimasukkan kedalam pemodelan untuk memaksimalkan hasil yang didapat. Implementasi pemodelan CT dari simulasi yang dilakukan kemudian diterapkan pada CT GI priok barat. Hasil implementasi pemodelan CT dilakukan analisis kinerja terhadap kejenuhan CT. Nilai THDi yang dapat diperoleh dari bentuk domain frekuensi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$THDi = \frac{I_{hmrs}}{I_{rms}} \times 100 \quad (1)$$

Model CT yang dibuat merupakan model CT yang dapat diterapkan pada kondisi operasi yang serupa dengan kondisi yang berada di lapangan seperti pada gambar 1. Pemodelan yang dilakukan dengan memasukkan kurva eksitasi Vrms-Irms dan nilai Rct dari hasil pengujian serta nilai arus hubung singkat yang terjadi dan nilai resistansi beban yang terhubung pada sisi sekunder CT.

Berikut model CT pada ATPDraw:



Gambar 1. Model ATPDraw.

Standar IEC 61869-2 digunakan sebagai rujukan dalam menentukan CT dalam keadaan baik atau dalam keadaan buruk. CT pada GI priok barat merupakan CT kelas PX, dimana dalam menentukan keadaan CT berdasarkan standar IEC 61869-2 terhadap beberapa parameter, yaitu seperti pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter CT Kelas Px Terhadap Standar Iec 61869-2.

$\epsilon-t$	Nilai $\epsilon-t$ terukur $\leq 0.25\%$
$E_k$	Nilai $E_k$ terukur $\geq$ Nilai rating $E_k$
$I_e$	Nilai $I_e$ terukur $<$ Nilai rating $I_e$
$K_x$	Nilai rating $K_x \leq$ Nilai $K_x$ terukur
$R_{ct}$	Nilai rating $R_{ct} \geq$ Nilai $R_{ct}$ terukur

Tabel 2 merupakan data rating CT yang berisikan parameter dalam menentukan keadaan CT pada GI priok barat kelas PX.

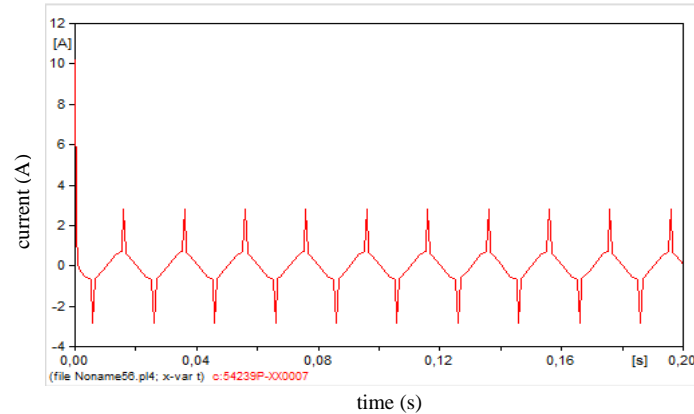
Tabel 2. Data Rating CT.

Primary current I-pn:	2500.0 A	Nominal Burden:	60.00 VA
Secondary current I-sn:	1.0 A	Operating Burden:	60.0 VA
Frequency:	50 Hz	Rct:	5.041 $\Omega$
Class:	PX	$K_x$ :	14.39 A
$E_k$ :	936.09 V	$I_e$ :	9.69 mA

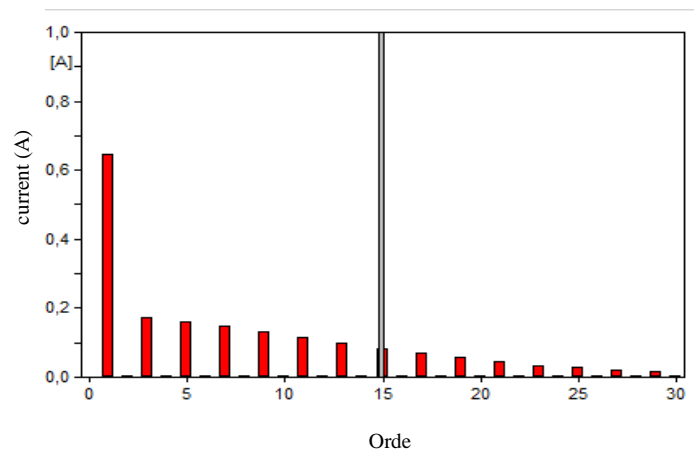
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Simulasi ATPDraw

Simulasi dilakukan dengan memasukan parameter nilai yang telah diperoleh dari hasil pengujian CT menggunakan CT-Analyzer OMICRON yaitu kurva eksitasi, burden, dan Rct. Simulasi dilakukan dengan menginjeksikan arus pada sisi primer sebesar 20 kA, dimana injeksi ini merupakan nilai arus hubung singkat yang terjadi pada saat gangguan di GI Priok Barat. Berikut hasil simulasi CT pada GI Priok Barat:



Gambar 2. Hasil Simulasi ATPDraw dalam Bentuk Domain Waktu.



Gambar 3. Hasil Simulasi ATPDraw dalam Bentuk Domain Frekuensi.



Dari hasil yang didapatkan dari simulasi menggunakan ATPDraw seperti yang ditampilkan oleh gambar 2 dan gambar 3 bahwa CT mengalami kejenuhan, kejenuhan tampak terlihat pada bentuk gelombang yang mengalami kecacatan dan terdistorsi begitupun pada bentuk domain frekuensi terlihat munculnya nilai harmonisa orde ganjil yang tinggi. Dengan menggunakan perhitungan THDi pada persamaan (1), dapat diketahui nilai THDi yang menyebabkan kejenuhan pada CT GI priok barat sebagai berikut:

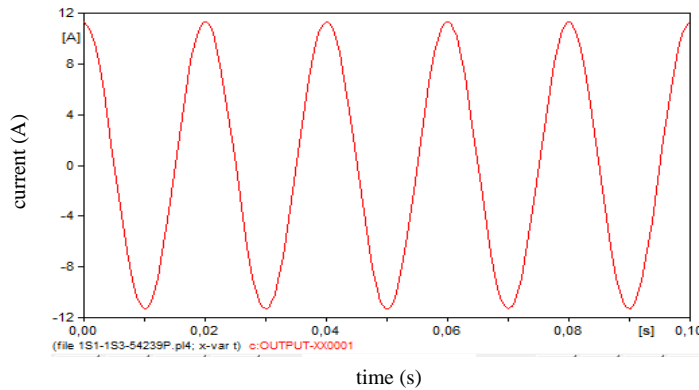
$$I_{hrms} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{0,18^2 + 0,17^2 + 0,14^2} = 0,284 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{0,64^2 + 0,18^2 + 0,17^2 + 0,14^2} = 0,7 \text{ A}$$

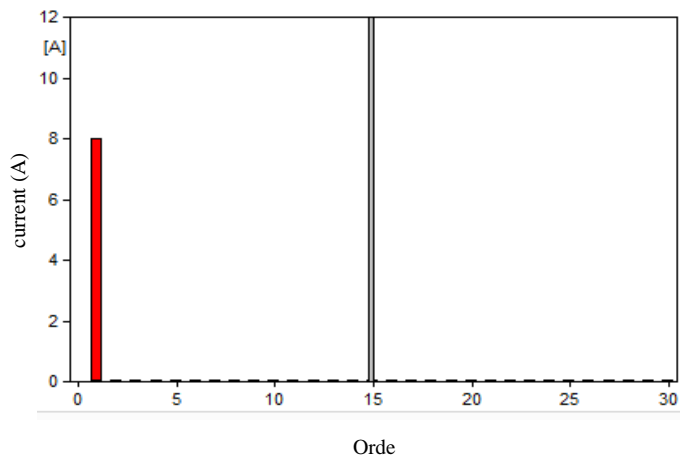
$$THDi = \frac{I_{hrms}}{I_{rms}} \times 100 = 40,612 \%$$

Dari hasil perhitungan di atas orde yang digunakan dalam menghitung THDi ini hanya menggunakan orde satu sampai orde 7, orde satu diwakili dengan I1, orde 3 diwakili dengan I3, orde 5 diwakili dengan I5, dan orde 7 diwakili dengan I7. Dari hasil yang didapat dari perhitungan nilai THDi sebesar 40.612%. Nilai THDi ini sudah melebihi ketentuan yaitu sebesar 5%. Sehingga dari bentuk gelombang yang terdistorsi dan harmonisa yang muncul sudah dikatakan bahwa CT pada GI priok barat mengalami kejenuhan.

Pada CT sebelumnya, yang mengalami kejenuhan akibat mengalirnya arus di sisi primer sebesar 20 kA terlihat dari bentuk gelombang yang terlihat cacat atau terdistorsi dan munculnya nilai orde-orde ganjil yang tinggi pada domain frekuensi. Berikut hasil simulasi CT pada GI Priok Barat setelah melakukan penggantian CT baru:



Gambar 4. Hasil Simulasi ATPDraw dalam Bentuk Domain Waktu Setelah Dilakukan Penggantian CT.



Gambar 5. Hasil Simulasi ATPDraw dalam Bentuk Domain Frekuensi Setelah Dilakukan Penggantian CT.

Dari hasil yang didapatkan dari simulasi menggunakan ATPDraw hasil penggantian CT seperti yang ditampilkan oleh gambar 4 dan gambar 5 bahwa CT tidak mengalami kejenuhan ketika mengalirnya arus hubung singkat sebesar 20 kA, CT dalam keadaan baik tampak terlihat pada bentuk gelombang yang masih dalam keadaan sinusoidal penuh, begitupun pada bentuk domain frekuensi munculnya nilai harmonisa orde ganjil yang sangat kecil. Dengan menggunakan perhitungan THDi, dapat diketahui nilai THDi CT dalam keadaan baik pada GI priok barat setelah dilakukan penggantian sebagai berikut:

$$I_{hrms} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{0,0049^2 + 0,0035^2 + 0,0022^2} = 0,0064411 \text{ A}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}$$

$$= \sqrt{8^2 + 0,0049^2 + 0,0035^2 + 0,0022^2} = 8 \text{ A}$$

$$THDi = \frac{I_{hrms}}{I_{rms}} \times 100 = 0,08 \%$$

Dari hasil perhitungan nilai THDi didapat nilai sebesar 0,08%. Sehingga dari bentuk gelombang yang ditampilkan dan muncul nya THDi sebesar 0,08% yang nilainya kurang dari 5% dapat dikatakan dalam keadaan baik dan tidak mengalami kejenuhan.

### 3.2. Hasil Pengujian CT Berdasarkan Standar IEC 61869-2

Dibawah ini merupakan hasil pengujian CT menggunakan CT-Analyzer pabrikan OMICRON, sebagai berikut:

Tabel 3. Resistansi *Secondary Winding*.

<b>R-meas:</b>	7432,57 Ω
<b>R-ref:</b>	5,041 Ω

Tabel 4. Rasio CT.

<b>Used Burden:</b>	60.0 VA
<b>Used I-p:</b>	2500.00A
<b>Ratio:</b>	2500.0 : 0.9
<b>Deviation:</b>	-10%
<b>RCF:</b>	1.11
<b>N:</b>	2475
<b>ε-t:</b>	-1%

Tabel 5. Hasil Eksitasi CT.

<b>EK:</b>	635.25 V	<b>Ie:</b>	13.5 mA
<b>Results with nominal burden:</b>		<b>Results with operating burden:</b>	
<b>Burden:</b>	60.0 VA	<b>Burden:</b>	60.0 VA
<b>Kx:</b>	0.084	<b>Kx:</b>	0.084

Tabel 6. Nilai Kurva *Vrms-Irms*.

<b>Vrms (V)</b>	<b>Irms (A)</b>
1147	2,958
1115	0,418
1081	0,0527
1068	0,03209
1053	0,02093
1033	0,01506
1004	0,01193
975,7	0,01065
940,1	0,009766
898	0,00907
848,3	0,008433
788,4	0,007778
717,5	0,00708
633	0,006307
536,9	0,005467
516,9	0,005285
502,8	0,005161
489,3	0,005045
477,9	0,004947
465,6	0,004843
453,6	0,00474
442	0,004643
429,9	0,004541
418,1	0,004442
86,28	0,001354

Dari data hasil pengujian pada tabel III sampai tabel VI diperoleh nilai  $\epsilon-t$  sebesar -1%,  $E_k$  sebesar 635,25 V,  $I_e$  sebesar 13,5 mA,  $K_x$  sebesar 0,084 dan  $R_{ct}$  7432,57  $\Omega$ . Hasil ini mengalami penyimpangan dari standar yang ditentukan, dimana nilai  $\epsilon-t \geq 0,25\%$ , nilai  $E_k$  yang terukur  $\leq$  nilai  $E_k$  rating, nilai  $I_e$  yang terukur  $\geq$  nilai  $I_e$  ratingnya, nilai  $K_x$  yang terukur  $\leq$  nilai  $K_x$  rating, dan nilai  $R_{ct}$  yang terukur  $\geq$  nilai  $R_{ct}$  rating nya. Nilai rating untuk CT pada GI priok barat seperti yang diperlihatkan pada tabel 2. Sehingga CT pada GI priok barat dapat dikatakan mengalami kejenuhan dikarenakan parameter yang didapatkan tidak sesuai dengan standar IEC 61869-2.

Setelah dilakukan penggantian CT pada GI priok barat diperoleh data hasil pengujian dengan nilai yang berbeda, yaitu:

Tabel 7. Resistansi Secondary Winding Hasil Penggantian dengan CT.

<b>R-meas:</b>	4.226 $\Omega$
<b>R-ref:</b>	5.041 $\Omega$

Tabel 8. Rasio Hasil Penggantian Dengan CT.

<b>Used Burden:</b>	60,0 VA
<b>Used I-p:</b>	2500,00A
<b>Ratio:</b>	2500,0 : 0,9994
<b>Deviation:</b>	-0,061%
<b>RCF:</b>	1,00061
<b>N:</b>	2499,74
<b><math>\epsilon-t</math>:</b>	-0,010%

Tabel 9. Hasil Eksitasi Penggantian CT.

<b>Ek:</b>	936.09 V	<b>Ie:</b>	9.68 mA
<b>Results with nominal burden:</b>		<b>Results with operating burden:</b>	
<b>Burden:</b>	60.0 VA	<b>Burden:</b>	60.0 VA
<b>Kx:</b>	14.39	<b>Kx:</b>	14.39

Tabel 10. Nilai Kurva Vrms-Irms Hasil Penggantian CT

<b>Vrms (V)</b>	<b>Irms (A)</b>
1147	2,958
1115	0,418
1081	0,0527
1068	0,03209
1053	0,02093
1033	0,01506
1004	0,01193
975,7	0,01065
940,1	0,009766
898	0,00907
848,3	0,008433
788,4	0,007778
717,5	0,00708
633	0,006307
536,9	0,005467
516,9	0,005285
502,8	0,005161
489,3	0,005045
477,9	0,004947
465,6	0,004843
453,6	0,00474
442	0,004643
429,9	0,004541
418,1	0,004442
86,28	0,001354
1	0,0000889

Setelah dilakukan penggantian CT dengan yang terhubung didapat hasil pengujian seperti yang diperlihatkan pada tabel 7 sampai tabel 10, dari hasil pengujian yang dilakukan data hasil pengujian dibandingkan terhadap tabel 2 berdasarkan standar yang dipakai, dimana tabel 2 merupakan data rating CT pada GI priok barat. Hasil yang diperoleh untuk melihat kinerja dari CT hasil penggantian bahwa nilai parameter  $\epsilon-t$ ,  $E_k$ ,  $I_e$ ,  $K_x$ ,  $R_{ct}$  diketahui bahwa nilai

yang didapat sesuai dengan standar yang digunakan, yaitu  $\varepsilon-t$   $-0,010\% \leq 0,25\%$ ,  $E_k$   $936,09V \geq 936,09V$ ,  $I_e$   $9,68 \text{ mA} < 9,69 \text{ mA}$ ,  $K_x$   $14,39 \text{ A} \leq 14,39 \text{ A}$ ,  $R_{ct}$   $5,041 \Omega \geq 4,226 \Omega$ . Sehingga CT yang dipakai dalam keadaan baik karena sesuai dengan standar yang ditetapkan yaitu berdasarkan standar IEC 61869-2.

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, maka penulis mengambil kesimpulan bahwa kondisi CT pada GI Priok Barat dari hasil pengujian terhadap nilai parameter  $\varepsilon-t$ ,  $E_k$ ,  $I_e$ ,  $K_x$ , dan  $R_{ct}$  berdasarkan standar IEC 61869-2, dengan nilai  $\varepsilon-t$  sebesar  $-1\%$ ,  $E_k$  sebesar  $635,25 \text{ V}$ ,  $I_e$  sebesar  $13,5 \text{ mA}$ ,  $K_x$  sebesar  $0,084 \text{ A}$  dan  $R_{ct}$  sebesar  $7432,57 \Omega$  mengalami ketidaksesuaian terhadap standar yang digunakan, serta dari hasil simulasi yang dilakukan bentuk gelombang yang ditampilkan mengalami kecacatan atau terdistorsi akibat munculnya harmonisa dengan nilai THDi yang muncul sebesar  $40,612 \%$ . Sehingga CT dapat dikatakan dalam keadaan rusak dan dalam keadaan jenuh. Setelah dilakukan penggantian CT pada GI Priok Barat didapatkan data dari hasil pengujian terhadap nilai parameter  $\varepsilon-t$ ,  $E_k$ ,  $I_e$ ,  $K_x$ , dan  $R_{ct}$  berdasarkan standar IEC 61869-2, dengan nilai  $\varepsilon-t$  sebesar  $-0,010\%$ ,  $E_k$  sebesar  $936,09 \text{ V}$ ,  $I_e$  sebesar  $9,68 \text{ mA}$ ,  $K_x$  sebesar  $14,39 \text{ A}$  dan  $R_{ct}$  sebesar  $4,226 \Omega$  bahwa setelah penggantian CT dilakukan nilai parameter yang didapatkan sesuai dengan standar dan hasil simulasi menunjukkan bahwa bentuk gelombang yang ditampilkan berbentuk sinusoidal penuh dengan muncul nya harmonisa dibawah  $5\%$  yaitu sebesar  $0,08\%$ . Sehingga CT setelah dilakukan penggantian dalam keadaan baik dan tidak mengalami kejenuhan. Faktor penyebab terjadinya kejenuhan pada transformator arus adalah munculnya arus yang sangat tinggi di sisi primer yang melebihi dari rating In dan nilai beban yang tinggi di sisi sekunder yang melebihi rating beban CT. Model ATPDraw yang dilakukan dapat digunakan dan diterapkan dalam mensimulasikan transformator arus guna melihat karakteristik dari CT yang ingin dimodelkan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Tenaga Listrik Program Studi Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani dan PT PLN UIT Jawa Bagian Barat atas dukungannya dalam keikutsertaan pada kegiatan penelitian ilmiah ini.

### Daftar Notasi

THDi = *Total harmonic Distortion* [%]  
 $E_k$  = *Rate knee point* [V]  
 $I_e$  = *Maximum exciting current* [A]  
 $K_x$  = *Dimensioning factor* [A]  
 $R_{ct}$  = *Secondary winding resistance* [Ohm]

### Daftar Pustaka

- Afonso, J. I., Toscano, P., & Briozzo, I. (2020a). Current Transformer model validation on EMTP-ATP software. 2020 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D LA 2020. <https://doi.org/10.1109/TDLA47668.2020.9326157>
- Afonso, J. I., Toscano, P., & Briozzo, I. (2020b). Current transformer modeling for electromagnetic transient simulation in protection systems. 2020 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D LA 2020. <https://doi.org/10.1109/TDLA47668.2020.9326170>
- Ahamed, R. M., & Rao, A. S. (2015). Saturation Analysis of Current Transformer. *International Journal of Research & Review (Www.Gkpublikation.In)*, 2(6), 337.
- Biswal, S., & Biswal, M. (2019). Detection of current transformer saturation phenomenon for secured operation of smart power network. *Electric Power Systems Research*, 175(October 2018), 105926. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105926>
- BPPT. (2019). Outlook Energi Indonesia 2019 The Impact of Increased Utilization of New and Renewable energy on the National Economy. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Education, M. (2021). Modelling of Power Transformer for Differential Protection Using ATP-EMTP. 12(9), 2770–2776.
- Georgiev, D., Rangelov, Y., & Georgiev, G. (2021). Current Transformer Performance under High Voltage Cable Related Transients. 2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2021, September. <https://doi.org/10.1109/Bulef53491.2021.9690825>
- Hasanah, A. W., Koerniawan, T., & Yuliansyah, Y. (2019). Kajian Ketelitian Current Transformer (CT) Terhadap Kesalahan Rasio Arus pada Pelanggan 197 kVA. *Energi & Kelistrikan*, 11(1), 9–16. <https://doi.org/10.33322/energi.v11i1.390>
- Herlender, J., Izykowski, J., & Solak, K. (2020). Compensation of the current transformer saturation effects for transmission line fault location with impedance-differential relay. *Electric Power Systems Research*, 182(January). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106223>

- IEC 61869-2. (2012). International Standard International Standard. In 61010-1 © Iec:2001 (Vol. 2003).
- Ilyas, I., & Agassy, M. T. (2021). ANALISIS KEGAGALAN CURRENT TRANSFORMER ( CT ) TIPE DUA BELITAN SEKUNDER DENGAN INTI MAGNETIK TERPISAH PADA SISTEM PROTEKSI DAN PEMBATA DAYA Iriandi Ilyas dan Muhamad Taufan Agassy Program Studi Teknik Elektro FTI-ISTN Jl . Moh . Kahfi II Jagakarsa , Jaka. Sinusoida, XXIII(1), 1–10.
- Kanokbannakorn, W., & Penthong, T. (2019). Improvement of a Current Transformer Model based on the Jiles-Atherton Theory. 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019, 3, 495–499. <https://doi.org/10.1109/GTDAAsia.2019.8715956>
- Marwan, M., L, R., & Samsul, N. M. (2016). Analisis Gangguan Tidak Seimbang pada Line Transmisi GI Sungguminasa-GI Tallasa. INTEK: Jurnal Penelitian, 3(2), 102. <https://doi.org/10.31963/intek.v3i2.60>
- Naseri, F., Kazemi, Z., Farjah, E., & Ghanbari, T. (2019). Fast Detection and Compensation of Current Transformer Saturation Using Extended Kalman Filter. IEEE Transactions on Power Delivery, 34(3), 1087–1097. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2895802>
- Seo, H. C., & Gwon, G. H. (2019). Systematization of the simulation process of transformer inrush current using EMTP. Applied Sciences (Switzerland), 9(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app9122398>
- Setia, G. A., Sianipar, G. H. M., & Paribo, R. T. (2016). The performance comparison between fast decoupled and backward-forward sweep in solving distribution systems. 3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2016, 247–251. <https://doi.org/10.1109/ICPERE.2016.7904871>
- Syahputra, R. (2015). Uji Karakteristik Transformator Arus Berbasis Perangkat Lunak EMTP (Characteristic Test of Current Transformer Based EMTP Software). JTE-U, 1(1), 1–5.
- Transformers—Part, I. (1996). 1: Current Transformers. IEC Std, 60, 41–44.
- Wen, J., Chen, W., Jiao, X., Wu, M., & Zheng, T. (2021). Integration of a Protection/Measurement Current Transformer based on Compensation Algorithm. 2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS), 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCEMS52239.2021.9646084>
- Zhao, J., Chen, W., Li, K., Teng, Z., Li, N., Wen, T., & Fan, X. (2023). Analysis of Conducted Disturbance via Current Transformer Due to Switch Operation of GIS Disconnecter in UHV Substation. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 9(3), 1227–1234. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.05580>