

Gusvira Lestari, Hajjar Yuliana, dan Sofyan Basuki

Simulasi *Indoor Building Coverage* (IBC) pada Teknologi *Long Term Evolution* (LTE) di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI

Fauzia Haz, Muhammad Rizki Akbar, dan Giri Angga Setia

Diagnosis Kondisi Minyak Transformator Menggunakan Teknik *Dissolved Gas Analysis*

Wirdatul Usrah, Syah Alam, dan Indra Surjati

Perancangan Antena Mikrostrip Frekuensi Ganda Menggunakan Metode Y Slot untuk Sistem Komunikasi 5G dan WiFi

Febri Panji Diharja, Mochammad Arif Irfa'i, dan Mohammad Munib Rosadi

Analisis Pengaruh Variasi Diameter *Driven Pulley* terhadap *Output* Kecepatan Putar dan Torsi Akhir pada Trainer Transmisi Toyota Kijang Innova E 2.0 M/T

Christiono, Miftahul Fikri, Dhami Johar Damiri, Muh. Rezha Safariansyah, Syahty Pratiwi, dan M. Reza Hidayat

Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator

Agustin Purwanti, Roni Farfan, Chairunnisa, Rifaldi Aji Sarifudin, dan Aditya Wisnu M.P

Kajian Optimasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan

M. Praditia Anzor, Simparmin Br. Ginting, Muhammad Haviz, dan Darmansyah

Dehidrasi Etanol Menggunakan Zeolit Teraktivasi Irradiasi Lampu Sinar Ultraviolet (*UV Light*) pada Kolom *Fixed Bed*

Manty Aldilani Ikaningsih, Ghazi Alwan Rafi, dan Djoko Hadi Prajitno

Studi Awal Pembuatan *Polymer Matrix Composite* (PMC) Epoksi yang Didoping Nanopartikel ZnO sebagai Material Antibakteri

Zul Fakhri, Ahmad Daelami, Bayudin, dan Atik Charisma

Sistem Pengaturan Pendingin Ruangan dengan Menggunakan *Thermoelectric* dan *Blower Motor Direct Current*

Gagan Ganjar Tabah dan Brilliant Dwinata

Penilaian Simpangan Pergerakan Interpolasi Angular pada Mesin Frais CNC Menggunakan *Double Ballbar*

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 : • Dr. Fitri Hadiah, S.T., M.T., IPM
Editorial Board (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 2022

- Reviewers :
- Prof. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 6506054959)
 - Prof. I. N. Suprpta Winaya, S.T., M.A.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana, Indonesia, Scopus ID : 18635759300)
 - Prof. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Eng. (PoliTeknik Negeri Bali, Scopus ID : 57189732631)*
 - Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM (Univerisitas Trisakti, Indonesia, Scopus ID: 15128239500)
 - Dr. Suhartono, S.T., M.Si (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 57189075734)*
 - Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID : 5984218)
 - Dr. Asep Najmurokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 55919091000)*
 - Dr. Dwi Hantoko, B.Sc., M.Sc. (Zhejiang University of Technology, China. Scopus ID: 57203536113)*
 - Dr. Herman Budi Harja, S.T., M.T. (Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia. Scopus ID: 57201665196)*
 - Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D. (Politeknik Negeri Semarang, Indonesia, Scopus ID : 57194209980)*
 - Dr. P.Y.M. Wibowo Nd., S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 55983351800)
 - Dr. Ir. Sutrisno, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 57205031839)
 - Dr. Ir. Nita Puspita Hidayat, M.T. (Universitas Islam Bandung, Indonesia Scopus ID : 57201677362)
 - Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia Scopus ID : 56682391600)
 - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T. (Universitas Brawijaya, Indonesia Scopus ID : 56688583600)
 - Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M. Eng. (Institut Pertanian Bogor, Scopus ID : 57195301854)
 - Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 57195229456)*

- Putu Doddy Sutrisna, S.T., M.T., Ph.D. (Universitas Surabaya, Indonesia, Scopus ID : 6504553709)
- Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 56951380600)
- Dr. Sabhan Kanata, ST.,M.Eng. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia, Scopus ID: 57205531562)
- Ir Harry Ramza M.T, Ph.D, MIPM (Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka, Indonesia, Scopus ID : 55189898100)
- Sofyan Basuki, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6686946)*
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPP. (Universitas Muslim Indonesia, Makasar, Scopus ID : 57201065526)*
- Nadiem Anwar S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID : 6098629)
- Ir. Nur Indrianti, M.T., D.Eng (UPN “Veteran” Yogyakarta, Indonesia, Scopus ID : 15071306300)
- Dr. Achmad Munir, M.Eng. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia, Scopus ID : 25638780900)
- P.Y.M. Wibowo Ndaruhadi, S.T., M.T., Ph.D (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 55983351800)
- Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, Scopus ID : 15838524700)
- Dr. Sutarno, Ir., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 57205031839)*
- Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D (Institut Teknologi Bandung, Indonesia, Scopus ID : 36093026700)
- Dr. Eng. Yoanda Alim Syahbana, S.T., M.Sc. (Politeknik Caltex Riau, Indonesia, Scopus ID : 37075904000)
- Tommi Hariyadi S.T., M.T. (Universitas Pendidikan Indonesia, Scopus ID : 53263841200)*
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57194219446)*
- Edwar, S.T., M.T. (Universitas Telkom, Indonesia. Scopus ID : 57215427881)
- Ir. Nana Heryana, IPM. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 35174665300)*
- Salita Ulitia Prini S.Kom., M.T. (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Indonesia.Scopus ID : 57208581701)*
- Naftalin Winanti, S.S.T., MT. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57200994613)*

- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. (Universitas Sebelas Maret, Indonesia. Scopus ID : 37114996900)*
- Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID : 57188573899)
- Atik Charisma, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57188567470)
- Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc. (Univeristas Islam Indonesia, Indonesia. Scopus ID : 57195477115)
- Syah Alam, S.Pd., M.T. (Universitas Trisakti, Indonesia. Scopus ID : 57191903622)
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T. (Univeristas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57193694034)
- Dr. Ir, Endang Prasetyaningsih, M.T. (Univesitas Islam Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57189580587)
- Dr. Ir. Ferry Rusgiarto, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57194649672)
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME. (Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia. Scopus ID : 6507211795)
- Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M. (Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia. Scopus ID : 23975188900)
- Aji Gumilar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID : 6082397)*

DAFTAR ISI

Simulasi <i>Indoor Building Coverage</i> (IBC) pada Teknologi <i>Long Term Evolution</i> (LTE) di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI Gusvira Lestari, Hajjar Yuliana, dan Sofyan Basuki	01-11
Diagnosis Kondisi Minyak Transformator Menggunakan Teknik <i>Dissolved Gas Analysis</i> Fauzia Haz, Muhammad Rizki Akbar, dan Giri Angga Setia	12-21
Perancangan Antena Mikrostrip Frekuensi Ganda Menggunakan Metode Y Slot untuk Sistem Komunikasi 5G dan WiFi Wirdatul Usrah, Syah Alam, dan Indra Surjati	22-31
Analisis Pengaruh Variasi Diameter <i>Driven Pulley</i> terhadap <i>Output</i> Kecepatan Putar dan Torsi Akhir pada Trainer Transmisi Toyota Kijang Innova E 2.0 M/T Febri Panji Diharja, Mochammad Arif Irfa'i, dan Mohammad Munib Rosadi	32-41
Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator Christiono, Miftahul Fikri, Dhami Johar Damiri, Muh. Rezha Safariansyah, Syahty Pratiwi, dan M. Reza Hidayat	42-51
Kajian Optimasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan Agustin Purwanti, Roni Farfian, Chairunnisa, Rifaldi Aji Sarifudin, dan Aditya Wisnu M. P	52-63
Dehidrasi Etanol Menggunakan Zeolit Teraktivasi Irradiasi Lampu Sinar Ultraviolet (<i>UV Light</i>) pada Kolom <i>Fixed Bed</i> Arief Rachman, dan M. Reza Hidayat	64-73
Studi Awal Pembuatan <i>Polymer Matrix Composite</i> (PMC) Epoksi yang Didoping Nanopartikel ZnO sebagai Material Antibakteri Manty Aldilani Ikaningsih, Ghazi Alwan Rafi, dan Djoko Hadi Prajitno	74-83
Sistem Pengaturan Pendingin Ruangan dengan Menggunakan <i>Thermoelectric</i> dan <i>Blower Motor Direct Current</i> Zul Fakhri, Ahmad Daelami, Bayudin, dan Atik Charisma	84-94
Penilaian Simpangan Pergerakan Interpolasi Angular pada Mesin Frais CNC Menggunakan <i>Double Ballbar</i> Gagan Ganjar Tabah dan Brilliant Dwinata	95-105

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 21 Nomor 1, bulan Mei 2022. 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) Simulasi *Indoor Building Coverage* (IBC) pada Teknologi *Long Term Evolution* (LTE) di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI, (2) Diagnosis Kondisi Minyak Transformator Menggunakan Teknik *Dissolved Gas Analysis*, (3) Perancangan Antena Mikrostrip Frekuensi Ganda Menggunakan Metode Y Slot untuk Sistem Komunikasi 5G dan WiFi, (4) Analisis Pengaruh Variasi Diameter *Driven Pulley* terhadap *Output* Kecepatan Putar dan Torsi Akhir pada Trainer Transmisi Toyota Kijang Innova E 2.0 M/T, (5) Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator, (6) Kajian Optimasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan, (7) Dehidrasi Etanol Menggunakan Zeolit Teraktivasi Irradiasi Lampu Sinar Ultraviolet (*UV Light*) pada Kolom *Fixed Bed*, (8) Studi Awal Pembuatan *Polymer Matrix Composite* (PMC) Epoksi yang Didoping Nanopartikel ZnO sebagai Material Antibakteri, (9) Sistem Pengaturan Pendingin Ruangan dengan Menggunakan *Thermoelectric* dan *Blower Motor Direct Current*, dan (10) Penilaian Simpangan Pergerakan Interpolasi Angular pada Mesin Frais CNC Menggunakan *Double Ballbar*.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 21 (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, perekayasa, 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, 31 Mei 2022

Dewan redaksi

Simulasi *Indoor Building Coverage* (IBC) pada Teknologi *Long Term Evolution* (LTE) di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI

Gusvira Lestari¹, Hajjar Yuliana¹, dan Sofyan Basuki¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

lestarigusvira@gmail.com, hajjar.yuliana@lecture.unjani.ac.id,

sofmae4@gmail.com, semnasmesinunjani@gmail.com

Abstrak

Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran adalah salah satu gedung perkuliahan di Universitas Jenderal Achmad Yani yang terdiri dari 4 lantai dan memiliki luas bangunan sebesar 4125,6 m². Gedung tersebut memiliki kualitas sinyal jaringan LTE *indoor* yang masih rendah serta level sinyalnya kecil. Hal ini disebabkan oleh konstruksi dan material didalam gedung yang dapat melemahkan kualitas sinyal LTE yang diterima. Kondisi tersebut membuat Gedung Fakultas Kedokteran UNJANI membutuhkan instalasi jaringan *indoor* tersendiri untuk memenuhi kebutuhan *user* didalam gedung. Maka dilakukan perencanaan *Indoor Building Coverage* menggunakan jaringan LTE pada operator Indosat Ooredoo dan memperhitungkan nilai dari parameter *Radio Frequency* (RF) yaitu *Reference Signal Received Power* (RSRP) dan *Signal to Interference Noise Ratio* (SINR). Proses perhitungan *coverage planning* pada perencanaan jaringan *indoor* menggunakan model propagasi *Cost 231 Multi Wall Model* dan disimulasikan pada *software Radiowave Propagation Simulator 5.4*. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai rata-rata RSRP sebesar -20,59 dBm dan SINR sebesar 34,30 dB. Nilai rata-rata tersebut dapat memenuhi kualitas sinyal diarea dalam gedung sebesar 89,12% untuk RSRP dan 97,45% untuk SINR. Hasil dari perencanaan dan simulasi jaringan *Indoor Building* telah memenuhi standar parameter RF untuk operator Indosat Ooredoo.

Kata kunci: *Coverage Planning*, *Indoor Building Coverage*, *LTE*, *Radiowave Propagation Simulator*

Abstract

Hindarto Joesman Building, Faculty of Medicine is one of the lecture buildings at Jenderal Achmad Yani University which consists of 4 floors and has a building area of 4125.6 m². The building has a low signal quality for the indoor LTE network. This is due to the construction and materials in the building which can weaken the quality of the LTE signal received. These conditions make the Faculty of Medicine UNJANI building require a separate indoor network installation to cover user needs inside the building. Indoor Building Coverage planning for this building can help to improve signal level and value of Reference Signal Received Power (RSRP) and Signal to Interference Noise Ratio (SINR). The process of calculating coverage planning in indoor network planning uses the Cost propagation model 231 Multi Wall Model and is simulated in the Radiowave Propagation Simulator 5.4 software. Based on the simulation results, the average RSRP value is -20.59 dBm and SINR is 34.30 dB. The average value can cover the signal quality in the building area of 89.12% for RSRP and 97.45% for SINR. The results of the planning and simulation of the Indoor Building network have met the standard RF parameters for operators.

Keywords: *Coverage Planning*, *Indoor Building Coverage*, *LTE*, *Radiowave Propagation Simulator*

1. Pendahuluan

Kebutuhan masyarakat akan teknologi telekomunikasi yang berkembang sangat cepat khususnya komunikasi seluler dalam kehidupan sehari-hari memerlukan kualitas layanan yang tinggi, karena saat ini teknologi komunikasi tidak hanya menunjang kebutuhan dasar manusia tetapi juga menjadi penunjang utama kegiatan ekonomi, politik dan kemajuan industri. Pengguna layanan tidak hanya bergerak di area luar gedung atau *outdoor* tetapi juga didalam area gedung atau *indoor*. Sinyal pancaran dari jaringan *Long Term Evolution* (LTE) *outdoor* yang terukur di dalam ruangan memiliki level sinyal yang cukup kecil dan tidak optimal jika diterima pelanggan. Hal ini disebabkan karena adanya material dan konstruksi bangunan yang dapat meredam sinyal. Selain itu, tidak keseluruhan area di dalam gedung dapat terjangkau oleh jaringan LTE seluruhnya dengan kualitas sinyal yang baik. Hal ini disebabkan belum terdapatnya instalasi jaringan *Indoor Building Coverage* (IBC) LTE pada gedung dan cakupan dari jaringan LTE *outdoor* tidak dapat melayani area dalam gedung (Lingga Wardhana, 2015).

Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran merupakan salah satu gedung di Universitas Jenderal Achmad Yani yang berada di Kota Cimahi tepatnya di Jalan Terusan Jenderal Sudirman. Gedung tersebut merupakan salah satu gedung lama yang terdiri dari 4 lantai dan belum ada sistem jaringan *indoor* yang terpasang di gedung tersebut. Kondisi gedung tersebut menyebabkan pelanggan ataupun pengguna jaringan 4G LTE di

Info Makalah:

Dikirim : 11-25-21;

Revisi 1 : 01-16-22;

Revisi 2 : 02-07-22;

Diterima : 03-07-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 812-2299-7113

e-mail : hajjar.yuliana@lecture.unjani.ac.id

area gedung tidak mendapatkan level sinyal yang optimal. Hal tersebut juga mempengaruhi buruknya kualitas sinyal jaringan LTE yang diterima diakibatkan konstruksi bangunan dan material gedung yang dapat meredam pancaran sinyal yang diterima di dalam ruangan. Maka, agar para pengguna jaringan 4G LTE mendapatkan kualitas sinyal yang baik maka dapat dilakukan perencanaan instalasi jaringan *Indoor Building Coverage* (IBC) LTE sebagai solusi untuk meningkatkan kualitas sinyal yang ada. (Hajjar Yuliana dkk., 2018).

Beberapa penelitian yang menunjang dan mendukung dalam penelitian ini telah dilakukan sebelumnya. Diantaranya adalah penelitian mengenai perencanaan jaringan IBC (*Indoor Building Coverage*) LTE di Bandara Hang Nadim Batam yang memiliki 2 lantai dari sisi *coverage* dan *capacity* dengan menggunakan operator Indosat Ooredoo pada frekuensi 900 MHz, serta mensimulasikan di *software* RPS 5.4 dengan mempertimbangkan nilai RF parameter RSRP dan SINR (Rachman dkk., 2018). Selain itu penelitian mengenai perancangan jaringan *indoor* LTE di RSUD Banyumas dari sisi *coverage* pada frekuensi 850 MHz dan 2300 MHz. Perencanaan ini menggunakan model propagasi *Cost 231 Multi Wall Model* dengan sistem *Femtocell*, serta mensimulasikan di *software* RPS 5.4 dengan mempertimbangkan nilai RF parameter RSRP dan SINR (Alfin Hikmaturokhman dkk., 2019). Penelitian selanjutnya merupakan perencanaan dan simulasi *Indoor Building Coverage* (IBC) pada jaringan LTE di Gedung Apartemen Grand Asia Afrika Residence yang memiliki 26 lantai dengan luas bangunan sebesar 44101,04 m² dari sisi *capacity* dan *coverage* dengan menggunakan operator XL Axiata, serta mensimulasikan di *software Radiowave Propagation Simulation* (RPS) 5.4 dengan mempertimbangkan nilai RF parameter RSRP dan SINR (Hastuti, 2017).

Oleh karena itu penulis mengangkat tema pada penelitian ini tentang perencanaan *Indoor Building Coverage* (IBC) pada jaringan LTE di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI menggunakan operator Indosat Ooredoo pada frekuensi 1800 MHz, dengan melakukan perencanaan *coverage planning* untuk mengetahui jumlah dan cakupan antenna yang diperlukan dengan simulasi menggunakan *software* RPS 5.4 serta dengan menganalisis nilai dari parameter RF seperti RSRP dan SINR setelah dilakukan perencanaan IBC.

2. Metode

In-Building Coverage (*Indoor System*) adalah suatu sistem yang memiliki perangkat pemancar dan penerima (*transceiver*) yang dipasang didalam suatu gedung dimana bertujuan untuk melayani kebutuhan layanan telekomunikasi dalam gedung tersebut, baik kualitas sinyal, cakupan area (*coverage area*) maupun kapasitas *traffiknya*. Pada dasarnya sistem *indoor building coverage* memiliki prinsip kerja yang sama dengan BTS (*Base Transceiver Station*) (Hajjar Yuliana, dkk., 2019). Perencanaan IBC dilakukan jika sebuah gedung memiliki kualitas sinyal yang rendah dengan user yang banyak. Salah satu tempat yang memiliki user yang banyak adalah gedung perkuliahan.

Dalam melakukan perencanaan *Indoor Building Coverage* dengan jaringan LTE di UNJANI, tahapan pertama yang harus dilakukan yaitu penentuan gedung dan survey lokasi. Tahap ini bertujuan untuk mengetahui spesifikasi dari gedung yang akan digunakan untuk perencanaan jaringan *indoor*, seperti luas gedung, denah gedung dan material gedung yang digunakan. Setelah spesifikasi atau data-data gedung tersebut didapatkan maka dilakukan *walktest* dengan menggunakan aplikasi *G-NetTrack* untuk mengetahui nilai dari parameter RF seperti RSRP dan SINR dengan menggunakan operator Indosat Ooredoo.

Setelah *walktest* kualitas sinyal di analisis dan dilakukan perencanaan *coverage planning* untuk memperbaiki kualitas sinyal tersebut. Perencanaan *coverage planning* pada IBC ini menggunakan model propagasi *Cost 231 Multi Wall Model* untuk perhitungannya (Alfin Hikmaturokhman dkk., 2019). *Coverage planning* ini bertujuan untuk menentukan jumlah antenna yang dibutuhkan agar dapat menerima sinyal LTE dengan kualitas sinyal yang baik di seluruh cakupan area gedung tersebut sesuai dengan standar KPI dari operator (Risma dkk, 2020). Serta simulasi perencanaan IBC dilakukan dengan menggunakan *software Radiowave Propagation Simulator* 5.4 (RPS) 5.4. Harapannya, dengan dilakukannya perencanaan *Indoor Building Coverage* (IBC), nilai RF parameter dari hasil perencanaan memenuhi atau bahkan melebihi nilai standar *Key Performance Indicator* (KPI) operator Indosat Ooredoo yaitu nilai RSRP > -90 dBm dan SINR > 3 dB. Jika hal ini terpenuhi, maka perencanaan jaringan LTE *indoor* dikatakan berhasil dan dapat dijadikan salah satu rekomendasi untuk operator seluler jika akan memasang *indoor building coverage* di Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran Universitas Jenderal Achmad Yani.

A. Penentuan Lokasi dan Informasi Gedung

Proses penentuan dan survey lokasi ini merupakan tahapan pertama dalam perencanaan jaringan *indoor* LTE dengan cara mengumpulkan data-data yang terkait dengan lokasi yang akan dilakukan perencanaan IBC. Data-data tersebut seperti denah gedung, luas gedung dan material gedung. Pada Gambar 1 merupakan gedung yang akan dilakukan perencanaan *Indoor Building Coverage*.

Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran adalah salah satu gedung perkuliahan di Universitas Jenderal Achmad Yani yang berlokasi di Jl. Terusan Jend. Sudirman, Cibeber, Kec. Cimahi Selatan, Kota Cimahi, Jawa Barat. Gedung ini memiliki 4 lantai dengan luas bangunan 4125,6 m² yang terdiri dari beberapa ruang pimpinan, sarana dan prasarana belajar mengajar, lobby, mushola, lift, aula dan *rooftop*. Untuk material utama gedung menggunakan dinding beton. Terdapat juga bahan material kayu (*wood*) yang digunakan untuk pintu setiap ruangan. Serta terdapat

juga material kaca disetiap ruangan di gedung tersebut. Informasi mengenai Gedung Fakultas Kedokteran UNJANI secara lebih rinci dapat disimak pada Tabel 1.



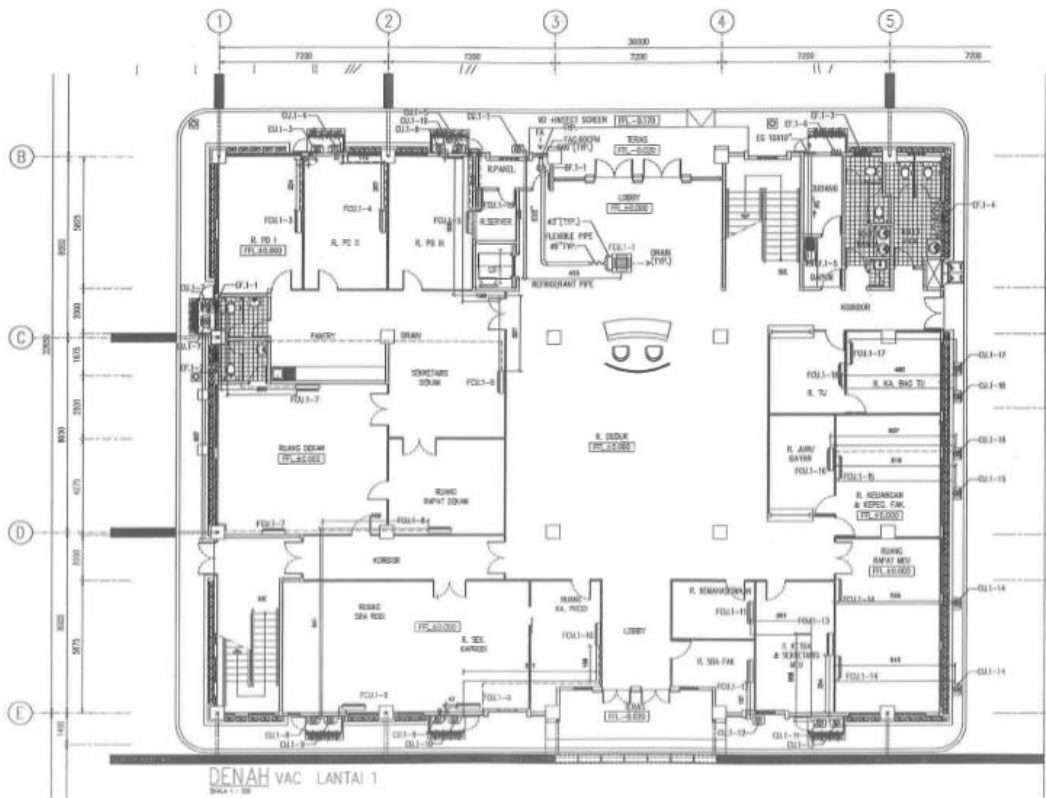
Gambar 1. Gedung Hindarto Joesman Fakultas Kedokteran UNJANI

Tabel 1. Data Aktual Gedung Fakultas Kedokteran UNJANI

No	Uraian	Kuantitas
1	Jumlah Lantai	4 lantai
2	Luas Bangunan	4125,6 m ²
3	Luas Lantai 4	887,4 m ²
4	Luas Lantai 3	887,4 m ²
5	Luas Lantai 2	1175,4 m ²
6	Luas Lantai 1	1175,4 m ²
7	Ruang Pimpinan	17 ruang
8	Ruang Panel	4 ruang
9	Mushola	1 buah
10	Ruang Belajar Mengajar	47 ruang
11	Lift	1 buah
12	Aula	1 buah

B. Layout Gedung

Denah atau *layout* gedung digunakan untuk mempermudah pada proses *walktest* dengan menggunakan aplikasi *G-NetTrack*. Gambar 2 merupakan contoh salah satu denah yang digunakan pada perencanaan ini, yaitu denah untuk lantai 1 Gedung Hindarto Joesman. Gedung Hindarto Joesman, umumnya memiliki luas lantai untuk setiap lantainya kira-kira sebesar 1175,4 m².

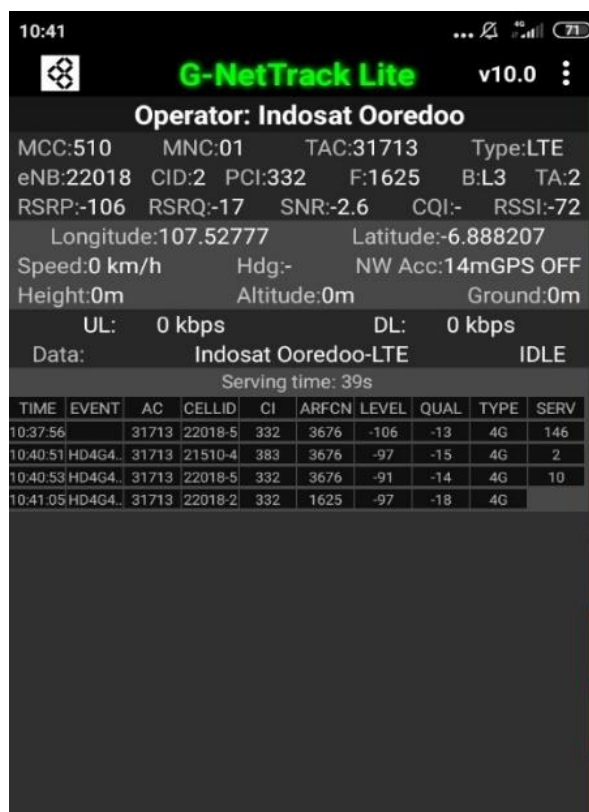


Gambar 2. Denah Gedung Hindarto Joesman Lantai 1

C. Analisis Hasil Walktest

Walktest merupakan suatu metode pengukuran yang digunakan untuk mengukur kualitas level sinyal secara aktual dengan berjalan kaki dalam suatu tempat seperti, hotel, gedung perkantoran, pasar, dan sebagainya dengan menggunakan aplikasi tertentu (C. Yanyun dkk, 2018). Walktest bertujuan mendapatkan data-data level dan kualitas sinyal yang dibutuhkan. Hal tersebut dilakukan sebagai analisis dan penunjang seberapa penting perencanaan coverage area jaringan indoor LTE ini dilakukan. Hasil dari walktest yang telah dilakukan selanjutnya juga dipergunakan untuk menganalisis kondisi level dan kualitas sinyal sebelum dan setelah dilakukan perencanaan jaringan indoor.

Walktest ini dilakukan untuk mengetahui nilai dari parameter RF yaitu RSRP dan SINR yang terukur di gedung serta untuk mengukur kondisi kualitas sinyal awal sebelum dilakukan perencanaan jaringan indoor. Walktest pada penelitian ini dilakukan menggunakan aplikasi G-NetTrack. Proses walktest dilakukan harus sesuai dengan layout gedung. Gambar 3 merupakan salah satu sample hasil walktest yang dilakukan di lantai 1 Gedung Hindarto Joesman dan Tabel 2 merupakan rekapitulasi hasil walktest pada setiap lantai di Gedung Hindarto Joesman.



Gambar 3. Hasil Walktest lantai 1 di Gedung Hindarto Joesman

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Walktest di Gedung Hindarto Joesman

No	Operator	Lantai	RSRP (dBm)	SINR (dB)
1	Indosat Ooredoo	Lantai 1	-114	3,6
2	Indosat Ooredoo	Lantai 2	-106	2,6
3	Indosat Ooredoo	Lantai 3	-104	4,2
4	Indosat Ooredoo	Lantai 4	-90	2,8

D. Coverage Planning

Coverage planning adalah salah satu metode perencanaan yang biasa dilakukan dalam perencanaan jaringan seluler baik *outdoor* maupun *indoor*. Pada tahapan ini perlu dipilih model propagasi yang akan digunakan pada penelitian ini berdasarkan area target, populasi dan *cluster*. Penggunaan model propagasi adalah suatu cara yang dapat dilakukan agar dapat memprediksi signal *propagation behavior* (Hajiar Yuliana dan Sofyan Basuki, 2019). Dengan menggunakan model propagasi yang tepat, maka tingkat keakuratan perhitungan dengan objek penelitian akan lebih tinggi sehingga dapat mengetahui hal-hal yang harus dipersiapkan dengan matang dalam perencanaan jaringan *indoor*.

Dengan menggunakan perencanaan *coverage* ini, perlu dilakukan perhitungan *coverage*. Perhitungan *coverage* ini dilakukan untuk menghitung kebutuhan jumlah antenna yang diperlukan pada perencanaan jaringan *indoor* di Gedung Hindarto Joesman. Pada proses perhitungan *coverage* ini diantaranya perlu dipersiapkan data-data atau informasi yang perlu dan akan digunakan pada perhitungan. Data-data tersebut diantaranya adalah seperti informasi gedung seperti denah dan luas gedung, kemudian menentukan model propagasi yang digunakan. Pada proses perhitungan *coverage* ini juga akan dilakukan perhitungan berdasarkan data parameter teknik dalam perencanaan seperti *loss* atau *gain* dari perangkat yang digunakan, perhitungan *link budget*, serta perhitungan untuk mendapatkan EIRP dan MAPL. Perhitungan dan data-data tersebut nantinya akan digunakan kembali untuk menghitung *path loss*, sehingga nantinya akan didapatkan cakupan area yang dibutuhkan serta jumlah antenna yang dibutuhkan dalam perencanaan jaringan *indoor* (Utami dkk., n.d.).

i. Model Propagasi

Model propagasi adalah suatu metode untuk memprediksi rata-rata kuat sinyal yang diterima oleh *Mobile Station* (MS) pada jarak tertentu dari antenna *transmitter* ke antenna *receiver*. Selain itu model propagasi dapat menentukan berapa besar daya maksimum yang harus dipancarkan oleh antenna BTS untuk menghasilkan kualitas pelayanan yang sama pada frekuensi yang berbeda (Irawaty dkk., 2018). Beberapa jenis model propagasi untuk

perencanaan jaringan *indoor*, yaitu *One Slope Model*, *Keenan Motley* dan *Cost 231 Multi Wall Model*. Model propagasi yang digunakan dalam perencanaan jaringan *indoor* di Gedung Hindarto Joesman adalah *Cost 231 Multi Wall Model*, karena merupakan model propagasi yang akan mempertimbangkan perhitungan antara *transmitter* dengan *receiver* berdasarkan kondisi material gedung baik pada bidang horizontal maupun vertikal, serta nilai redaman material dindingnya diperhitungkan pula sehingga nantinya berdasarkan perhitungan propagasi yang digunakan akan didapatkan kondisi yang sesuai dengan kondisi sebenarnya.

ii. Link Budget

Link budget merupakan suatu metode perhitungan *link* dalam perencanaan sebuah jaringan. Perhitungan ini memperhitungkan sejumlah daya yang didapat di penerima sepanjang jalur transmisi radio dari pemancar ke penerima (Benazzouz, 2014). Parameter yang diperhitungkan pada perhitungan *link budget* diantaranya adalah redaman kabel (dB), *gain* antenna (dBi), redaman konektor yang terpasang di kabel (dB), sensitivitas di penerima (dB), dan komponen lainnya.

$$\Sigma L_{\text{saluran}} = \Sigma L_{\text{feeder}} + \Sigma L_{\text{splitter}} + \Sigma L_{\text{combiner}} + \Sigma L_{\text{connector}} \quad (1)$$

iii. Perhitungan EIRP dan MAPL

Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) secara konsep adalah pengukuran daya yang dihitung berdasarkan daya yang terpancar dari antenna dalam satu arah. EIRP ini dinyatakan dalam bentuk perhitungan persamaan, yaitu berupa perhitungan besar daya antenna di pengirim dijumlahkan dengan penguatan antenanya. Perhitungan tersebut juga memperhitungkan besarnya redaman disisi saluran selama proses transmisi.

$$\text{EIRP} = \text{Tx Power (dBm)} + \text{Antenna Gain (dB)} - \text{Loss Saluran} \quad (2)$$

Sedangkan *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) adalah suatu metode perhitungan untuk mengidentifikasi nilai *pathloss* maksimum yang diizinkan antara pemancar hingga sampai ke penerima. Karena nilai MAPL akan mempengaruhi kualitas sinyal yang diterima oleh *receiver*. Perhitungan MAPL (*Maximum Allowable Path Loss*) harus dilakukan untuk menentukan nilai redaman maksimum propagasi yang diizinkan agar *eNodeB* dapat melayani komunikasi semua *user* pada area cakupannya (Utami, D.L., 2017)

$$\begin{aligned} \text{MAPL} = & \text{EIRP} - \text{Receiver Sensitivity} - \text{Interference Margin} + \text{Rx Antena Gain} - \text{Body Loss} \\ & - \text{Log Normal Fading Margin} \end{aligned} \quad (3)$$

iv. Perhitungan Path Loss dan Radius Antena

Path loss merupakan redaman yang terjadi dan terukur yang disebabkan oleh bahan material gedung atau bangunan seperti material kaca, kayu, beton, bata, atau material lain yang menjadi bahan bangunan tersebut. Persamaan untuk menghitung *path loss* ini ditentukan berdasarkan model propagasi yang digunakan. Model propagasi yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah *Cost 231 Multi Wall Model* untuk perencanaan jaringannya.

$$L_T = L_{\text{FSL}} + L_C + \sum_{i=1}^M n_{wi} L_{wi} + n_f \left[\frac{(nf+2)}{(nf+1)} \right]^b L_f \quad (4)$$

Dari perhitungan *path loss* ini akan didapatkan hasil radius antena. Radius antena dapat mempengaruhi analisis terhadap jarak maksimal dari sinyal yang dipancarkan oleh antena ke setiap area di gedung tersebut. Pada perhitungan *path loss* ini perlu juga diperhitungkan nilai *loss* dari material konstruksi gedung tersebut. Material ini akan memberikan nilai redaman material terhadap level sinyal yang ada diarea tersebut.

Tabel 3. Redaman Material Bangunan Lantai 1

Material	Redaman (dB)	Jumlah	Total (dB)
Concrete	10	2	20
Brick	3,5	3	10,5
Glass Window	2	3	6
Wood Door	4	3	12
Glass	0,8	3	2,4
<i>Indoor loss</i>			50,9

v. Penentuan Cakupan dan Jumlah Antena

Perhitungan luas cakupan antena pada sebuah perencanaan jaringan baik *indoor* maupun *outdoor*, umumnya menggunakan model sel berbentuk heksagonal. Para perencanaan jaringan *indoor*, perhitungan area cakupan dilakukan dengan skema pemodelan menggunakan antena *omnidirectional*.

$$L_{cakupan} = 2,6 \times d^2 \quad (5)$$

Sedangkan untuk mendapatkan jumlah antenna yang dibutuhkan dalam perencanaan jaringan *indoor* di Gedung Hindarto Joesman dapat dihitung dengan persamaan (6).

$$\sum \text{antena} = \frac{L_{area}}{L_{cakupan \text{ antenna}}} \quad (6)$$

vi. Parameter RF yang dianalisis

a. Reference Signal Received Power (RSRP)

Reference Signal Received Power merupakan parameter yang menyatakan tingkat kekuatan sinyal yang terukur di penerima. RSRP ini dinyatakan dalam satuan dBm. Nilai RSRP bergantung pada jarak *user* terhadap eNodeB. Semakin jauh maka semakin lemah, begitu juga dengan sebaliknya. RSRP berfungsi memberikan informasi ke UE (*User Equipment*) mengenai kekuatan sinyal pada suatu sel berdasarkan perhitungan *path loss* (Huawei Technologies Co., 2020).

Tabel 4. Standar RSRP Indosat Ooredoo

Kode Warna	Range RSRP (dBm)	Kualitas Sinyal
	$-60 \leq \text{RSRP} < 0$	Sangat baik
	$-70 \leq \text{RSRP} < -60$	Baik
	$-80 \leq \text{RSRP} < -70$	Cukup baik
	$-90 \leq \text{RSRP} < -80$	Cukup buruk
	$-100 \leq \text{RSRP} < -90$	Buruk
	$-120 \leq \text{RSRP} < -100$	Sangat buruk

b. Signal to Interference Noise Ratio (SINR)

SINR merupakan sebuah parameter yang berfungsi untuk menunjukkan tingkat kualitas sinyal yang diterima oleh user. SINR ini dinyatakan dalam satuan dB. Nilai SINR didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan level sinyal yang diterima dengan derau/interferensi. (Huawei Technologies Co., 2020).

Tabel 5. Standar SINR Indosat Ooredoo

Kode Warna	Range SINR (dB)	Kualitas Sinyal
	$\text{SINR} \geq 20$	Sangat baik
	$10 \leq \text{SINR} < 20$	Baik
	$3 \leq \text{SINR} < 10$	Cukup baik
	$0 \leq \text{SINR} < 3$	Cukup buruk
	$-5 \leq \text{SINR} < 0$	Buruk
	$\text{SINR} < -5$	Sangat buruk

3. Hasil dan Pembahasan

a. Jumlah Antena

Jumlah antenna ditentukan berdasarkan hasil perhitungan *coverage planning* yang bertujuan agar antenna yang diletakkan pada setiap lantai dapat meng-*cover* atau memperbaiki kualitas sinyal yang buruk menjadi lebih baik pada gedung tersebut. Perhitungan antenna tersebut didapatkan dari nilai *path loss* yang dipengaruhi oleh besarnya nilai redaman dalam gedung (*Indoor Loss*) yang berbeda disetiap lantainya.

Tabel 6. Jumlah Antena berdasarkan *Coverage Planning*

No	Lantai	Jumlah Antena
1	1	4
2	2	5
3	3	7
4	4	4
Total		20 Antena




b. Indoor Building Coverage Planning pada Software RPS 5.4

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Radiowave Propagation Simulator 5.4* (RPS 5.4). *Software* RPS ini mampu untuk mensimulasikan daya pancaran dari antenna yang terpasang di tiap lantai dalam bentuk 2D dan 3D, serta terdapat *tool* untuk memilih model propagasi, tipe antenna, pemilihan material gedung agar lebih sesuai dengan gedung aslinya dengan membuat titik koordinat saat mendesain. Sebelum desain disimulasikan pada

software RPS 5.4, terlebih dahulu dibutuhkan data-data gedung yang digunakan dalam perencanaan jaringan IBC ini. Data-data gedung tersebut seperti, denah gedung, material gedung.

Material gedung disini dibutuhkan agar dapat mengetahui nilai redaman material yang ada pada gedung tersebut. Desain gedung dan proses simulasi yang dilakukan pada *software* RPS dilakukan per lantai, agar dapat mengetahui nilai redaman material secara lebih detail serta jumlah antenna yang dibutuhkan untuk memperbaiki kualitas di setiap lantai gedung tersebut. Nilai redaman tersebut dipengaruhi oleh material yang digunakan pada gedung. Pada Tabel 7 menjelaskan simbol warna setiap material yang digunakan, serta pada Tabel 8 menjelaskan tentang spesifikasi material yang digunakan. Simulasi yang dilakukan akan mendapatkan nilai keluaran dari RF Parameter, yaitu nilai RSRP dan SINR dari antenna yang dipancarkannya.

Tabel 7. Simbol Material Gedung pada *Software* RPS 5.4

Material	Simbol Warna
Concrete	
Brick	
Wood	
Glass	
Glass Window	

Tabel 8. Spesifikasi Material pada *Software* RPS 5.4

Material	Concrete floor and ceiling, Brick inner wall, Glass window, Wood, Glass
Transmit Power	43 dBm
Carrier Frequency	1,8 GHz
Noise Figure	7 dB
Loss	28,4 dB ; 32,1 dB ; 30,9 dB ; 28,3 dB

c. Analisis Hasil Simulasi

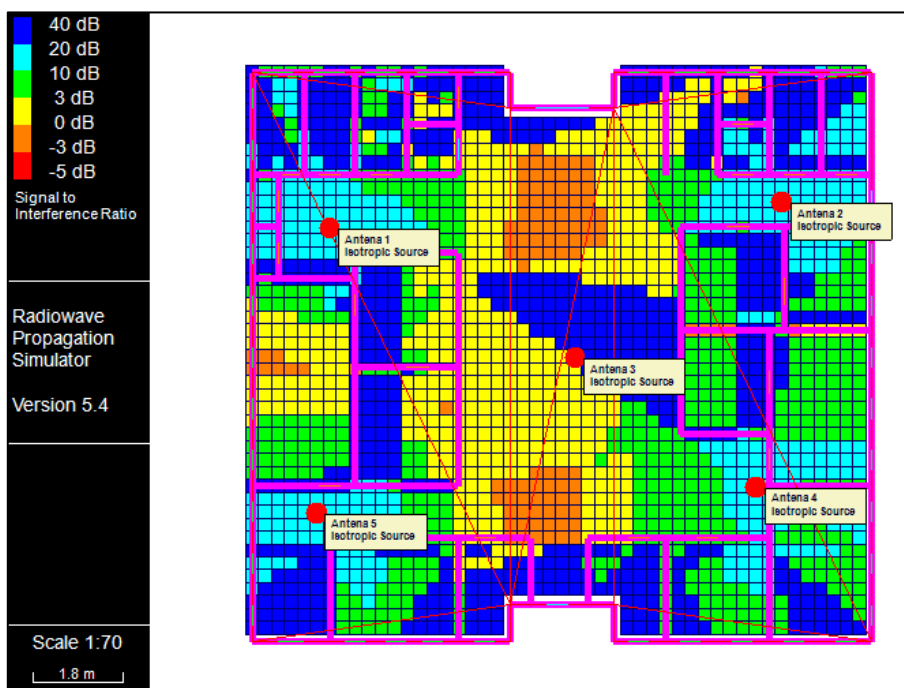
Proses rekapitulasi berfungsi untuk membandingkan antara nilai Parameter RF yang dianalisis yaitu RSRP dan SINR yang didapatkan dari hasil *walktest* saat perencanaan dan hasil simulasi dengan menggunakan *software Radiowave Propagation Simulator* (RPS) 5.4. Tabel 9 merupakan perbandingan data antara kondisi gedung secara aktual yang tidak memiliki sistem *indoor building coverage* dengan kondisi hasil simulasi untuk gedung yang sudah memiliki sistem *indoor building coverage*. Dari tabel tersebut bahwa hasil sebelum dilakukan perencanaan IBC masih berada dibawah standar KPI parameter RF Indosat Ooredoo yaitu RSRP < -90 dBm dan SINR < 3 dB yang menyebabkan area di Gedung Hindarto Joesman tidak dapat melayani kebutuhan *user* dengan baik di seluruh area. Tetapi setelah dilakukan perencanaan *Indoor Building Coverage* dengan menggunakan *software* RPS 5.4 pada proses simulasi, area gedung memiliki kualitas sinyal yang lebih baik dari sebelum perencanaannya, hal ini dapat dilihat dari standar KPI operator Indosat Ooredoo telah dipenuhi dalam perencanaan IBC di Gedung Hindarto Joesman Cimahi yaitu nilai RSRP > -90 dBm dan SINR > 3 dB.

Tabel 10 dan Tabel 11 menunjukkan persentase dari hasil simulasi perencanaan IBC di tiap lantai. Persentase yang ditampilkan menunjukkan persentase *coverage* dari beberapa level yang tersebar di lantai gedung tersebut. Berdasarkan kedua tabel tersebut, menunjukkan bahwa Gedung Hindarto Joesman memiliki kondisi *coverage* mencapai 89,12% untuk nilai RSRP dengan level lebih besar dari -90 dBm dan untuk nilai SINR dengan level lebih besar dari 3 dB mencapai persentase 97,45%. Hal ini menunjukkan bahwa, dengan dilakukan perencanaan *indoor building coverage* pada Gedung Hindarto Joesman dapat memperbaiki level sinyal baik itu dari level RSRP maupun SINR-nya. Dan hal ini dapat dibuktikan dengan simulasi yang telah dilakukan. Sehingga, perencanaan ini dapat dijadikan acuan untuk digunakan sebagai implementasi pemasangan antenna *indoor*, khususnya untuk operator Indosat Ooredoo.

Kondisi pada Tabel 10 dan Tabel 11 khususnya pada lantai 1, ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pada lantai 1 Gedung Hindarto ini, direncanakan akan dipasang 5 antenna *omnidirectional* di area dalam gedung. Berdasarkan perencanaan dan pemasangan yang dilakukan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4, menunjukkan legend RSRP warna biru tua untuk level sinyal antara 0 sampai -60 dBm mendominasi hingga 71,35 % dari keseluruhan ruangan. Begitupun dengan hasil simulasi SINR lantai 1 yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Untuk legend SINR warna biru tua dengan level di atas 20 dB memiliki persentase sebesar 29,92 % dari total keseluruhan luas gedung.



Gambar 4. Hasil Simulasi RSRP Setelah Perencanaan di Lantai 1



Gambar 5. Hasil Simulasi SINR Setelah Perencanaan di Lantai 1

Tabel 9. Perbandingan Level Sinyal Aktual dan Hasil Simulasi

No	Lantai	Hasil Walktest		Hasil Simulasi		Kenaikan Kualitas Sinyal	
		RSRP (dBm)	SINR (dB)	RSRP (dBm)	SINR (dB)	RSRP (dBm)	SINR (dB)
1	Lantai 1	-114	3,6	-38,66	20,79	75,34	17,49
2	Lantai 2	-106	2,6	-54,75	50,42	51,25	47,82
3	Lantai 3	-104	4,2	-51,88	36,13	52,12	31,93
4	Lantai 4	-90	2,8	-40,83	29,85	49,17	27,05

Tabel 10. Persentase RSRP Hasil Simulasi

Kode Warna	Range RSRP (dBm)	Kualitas Sinyal	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 3	Lantai 4	Rata-rata (Semua Lantai)
	$0 \leq \text{RSRP} < -60$	Sangat baik	71,35 %	39,77 %	43,49 %	73,24 %	59,96 %
	$-60 \leq \text{RSRP} < -70$	Baik	24,74 %	42,57 %	38,35 %	16,08 %	30,43 %
	$-70 \leq \text{RSRP} < -80$	Cukup baik	0,98 %	2,32 %	0,98 %	2,02 %	1,57 %
	$-80 \leq \text{RSRP} < -90$	Cukup buruk	0,24 %	0,24 %	0,00 %	0,13 %	0,15 %
	$-90 \leq \text{RSRP} < -100$	Buruk	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
	$-100 \leq \text{RSRP} < -120$	Sangat buruk	2,69 %	15,10 %	17,18 %	8,53 %	10,87 %
Total			100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
RSRP > -90 dBm			97,31 %	84,9 %	82,82 %	91,47 %	89,12 %

Tabel 11. Persentase SINR Hasil Simulasi

Kode Warna	Range SINR (dB)	Kualitas Sinyal	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 3	Lantai 4	Rata-rata (Semua Lantai)
	$\text{SINR} \geq 20$	Sangat baik	29,92 %	68,37 %	49,93 %	61,46 %	52,42 %
	$10 \leq \text{SINR} < 20$	Baik	18,50 %	14,82 %	19,92 %	11,78 %	16,25 %
	$3 \leq \text{SINR} < 10$	Cukup baik	23,72 %	7,10 %	12,63 %	13,80 %	14,31 %
	$0 \leq \text{SINR} < 3$	Cukup buruk	24,94 %	6,34 %	13,80 %	12,63 %	14,42 %
	$-5 \leq \text{SINR} < 0$	Buruk	2,54 %	3,22 %	2,28 %	0,20 %	2,06 %
	$\text{SINR} < -5$	Sangat buruk	0,38 %	0,15 %	1,44 %	0,13 %	0,52 %
Total			100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
SINR > 3 dB			97,08 %	96,63 %	96,28 %	99,67 %	97,45 %

Kesimpulan

Hasil Simulasi perencanaan jaringan *Indoor Building Coverage* (IBC) di Gedung Hindarto Joesman menggunakan operator Indosat Ooredoo mengalami peningkatan kualitas sinyal disetiap lantainya. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya peningkatan nilai RSRP sebesar 75,34 dB dan SINR 17,49 dB untuk lantai 1. Kemudian pada lantai 2, terdapat kenaikan RSRP sebesar 51,25 dB dan SINR 47,82 dB. Pada lantai 3, terjadi kenaikan RSRP sebesar 52,12 dB dan SINR 31,93 dB. Sedangkan pada lantai 4, terjadi kenaikan nilai RSRP sebesar 49,17 dB dan SINR 27,05 dB. Hasil simulasi tersebut telah memenuhi nilai standar parameter RF operator Indosat Ooredoo. Dan juga memenuhi nilai standar operator secara umumnya.

Pada perhitungan *coverage planning* perencanaan jaringan *Indoor Building Coverage* didapatkan hasil sebanyak 20 antena yang dibutuhkan di gedung tersebut, dengan pembagian 4 buah antena untuk lantai 1, 5 buah antena untuk lantai 2, 7 buah antena untuk lantai 3 dan 4 buah antena untuk lantai 4. Setelah dilakukan simulasi, kualitas sinyal LTE di Gedung Hindarto Joesman untuk nilai RSRP > -90 dBm dapat memenuhi are sebesar 89,12% dan untuk nilai SINR > 3 dB sebesar 97,45%.

Daftar Notasi

- L_T = maximum allowable path loss
- L_{FSL} = loss free space loss (dB)
- M = banyaknya tipe dinding
- L_{wi} = nilai loss material gedung (dB)
- nf = jumlah lantai yang dilalui sinyal
- L_c = constant loss (dB)
- n_{wi} = jumlah tipe dinding i yang dilalui

L_f = loss antar lantai (dB)
b = empirical parameter (0,46)
FMHz = frekuensi (MHz)
 d_{km} = radius (km)
 $L_{cakupan}$ = luas cakupan antena/ sel (m²)
D = radius antena (m)

Daftar Pustaka

- Alfin Himaturokhman, L. B. (n.d.). Analisa Model Propagasi Cos 231 Multi Wall pada Perancangan Jaringan Indoor Femtocell HSDPA Menggunakan Radiowave Propagation Simulator. Purwokerto: Sekolah Tinggi Teknologi Telematika Telkom.
- Benazzouz, Y. C. (2014). Sharing User IoT Devices in the Cloud. *IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT) Sharing*, 373-374.
- C. Yanyun, H. A. (2018). Coverage and Capacity Optimization for 4G LTE Networks Using Differential Evolution. *5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*.
- Co., H. T. (2020). *LTE Radio Network Capacity Dimensioning*. Huawei.
- Hajjar Yuliana, A. C. (2018). Perencanaan dan Simulasi Indoor Building Coverage (IBC) Pada Jaringan Long Term Evolution (LTE) Menggunakan Radiowave Propagation Simulation (RPS). *Semnastek UMJ*. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta (UMJ).
- Hajjar Yuliana, S. B. (2019). Indoor Signal Quality Improvement using Coverage Planning Method in Indoor Building Coverage Simulation. *IEEE 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, (pp. 1-5).
- Hajjar Yuliana, S. B. (2019). *Optimasi Jaringan Seluler XL LTE Di Area Kampus Unjani Cimahi*. Cimahi: LPPM Unjani.
- Hastuti, B. T. (2017). *Perencanaan Indoor Building Coverage (IBC) Teknologi LTE di Apartemen Grand Asia Afrika Residence*. Bandung.
- Irawaty, M. U. (2018). Optimasi Jaringan 4G LTE (Long Term Evolution) Pada Kota Balikpapan. *Jurnal Ecotype*, Vol.5, No.2.
- Lingga Wardhana, A. H. (2015). *4G Handbook Jilid 2*. nulisbuku.com.
- Muhammad Amanaf, A. W. (2019). Simulasi Perancangan Indoor Building Coverage (IBC) Pada Jaringan 4G LTE Frekuensi 850 MHz di RSUD Banyumas Menggunakan RPS 5.4. *Journal of Technology and Informatic*.
- Rachman, U. M. (2018). In Building Coverage (IBC) LTE Network Planning Analysis at Hang Nadim Airport. *ISSN E-Proceeding of Engineering*.
- Risma, H. Y. (2020). *Perencanaan Newsite Untuk Jaringan 4G Dengan Metode Coverage Area Planning Di Area Manonjaya Tasikmalaya*. Teknik Elektro, UNJANI.
- Utami, D. L. (2017). Analisis Kinerja Coverage dan Kualitas Sinyal 4G Pda operator Seluler di Kota Purbalingga. *Jurnal Media Elektrika*.
- Utami, F. K. (n.d.). *Perencanaan Femtocell 4G LTE 1800MHz Studi Kasus Gedung Baru ST3 Telkom Purwokerto*. Semarang: Universitas Diponegoro.

Diagnosis Kondisi Minyak Transformator Menggunakan Teknik *Dissolved Gas Analysis*

Fauzia Haz¹, Muhammad Rizki Akbar¹, dan Giri Angga Setia¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

fauzia.haz@lecture.unjani.ac.id, akbarrizki02@gmail.com, giri.anggasetia@gmail.com

Abstrak

Pada PLTA Cikalong terdapat 3 Transformator tenaga dengan rating tegangan sebesar 6,3/77 kV, karena usia yang cukup lama, perlu dilakukan analisis terhadap kondisi minyak transformator. Salah satu cara untuk mengetahui kadar *fault gas* yang terdapat pada minyak transformator dengan uji DGA (*Dissolved Gas Analysis*). DGA akan mengekstraksi gas tersebut untuk mengetahui indikasi gangguan berdasarkan hasil interpretasi data gas-gas terlarut yakni dengan metode *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG), Key Gas, Roger's Ratio, Doernenberg's Ratio dan Duval's Triangle. Metode ini diusulkan agar dapat mengetahui kondisi minyak transformator dalam keadaan normal atau tidak, selanjutnya mengukur nilai tegangan tembus dan menghitung nilai kolerasi antara jam operasi dan jumlah produksi daya. Hasil analisis DGA pada Transformator unit 1, 2, dan 3 Sub Unit PLTA Cikalong menunjukkan nilai TDCG pada kondisi 1, yang berarti seluruh transformator dalam kondisi baik. Nilai koefisien korelasi antara jam operasi dan jumlah produksi kWh dengan TDCG masing-masing sebesar 0,267 dan 0,297 yang menandakan hubungan antara variabel tersebut merupakan hubungan yang lemah (standar nilai mendekati 1).

Kata kunci: Minyak Transformator, *Dissolved Gas Analysis*, Tegangan Tembus

Abstract

At the Cikalong hydropower plant there are 3 power transformers with a voltage rating of 6.3/77 kV, because of their long life, it is necessary to analyze the condition of the transformer oil. One way to determine the level of fault gas contained in transformer oil is the DGA (*Dissolved Gas Analysis*) test. DGA will extract the gas to find out indications of disturbance based on the interpretation of the dissolved gases data, namely the Total Dissolved Combustible Gas (TDCG), Key Gas, Roger's Ratio, Doernenberg's Ratio and Duval's Triangle methods. This method is in order to determine the condition of the transformer oil is normal or not, measure the breakdown voltage value and calculate the correlation value between operating hours and the amount of power production. The results of the DGA analysis on transformer units 1, 2, and 3 of the Cikalong hydropower sub-unit show the TDCG value in condition 1, which includes all transformers in good condition. The value of the correlation coefficient between hours of operation and the number of kWh production with TDCG is 0.267 and 0.297, respectively, which indicates the relationship between these variables is a weak relationship (standard value is close to 1).

Keywords: Transformer Oil, Dissolved Gas Analysis, Breakdown Voltage.

1. Pendahuluan

Transformator PLTA Cikalong memiliki kapasistas 6,3/77 kV dan 8 MVA. Pada unit 1 dan unit 3 sudah melewati usia 50 tahun, sedangkan untuk Transformator unit 2 sudah dilakukan pergantian sejak 2011. Operasional Transformator yang berlangsung 24 jam kontinyu membutuhkan perhatian yang ekstra agar keandalan transformator tetap terjaga (Haz and Aditya, 2020). Salah satu komponen Transformator yang wajib dilakukan pemantauan adalah minyak transformator. Minyak transformator berfungsi sebagai media pendingin dan juga isolator. Ketika terjadi gangguan didalam Transformator, maka akan timbul gas-gas yang disebut sebagai *fault gas* dalam minyak transformator (Hidayat *et al.*, 2020). Apabila kadarnya melebihi ambang batas, maka akan mengakibatkan kerusakan bahkan dapat membuat Transformator terbakar. Hal ini tentu saja selain membahayakan personel juga membahayakan peralatan. Selain itu status pembangkit juga menjadi FO atau *force outage* yang tentu saja merugikan perusahaan dan masyarakat karena listrik menjadi padam (P, Taqiyudin and Basuki, 2018). Pada penelitian mengenai Analisa Kondisi Minyak Isolasi Transformator Berdasarkan Pengujian DGA Pada Transformator 3 150/20 kV 60 MVA PT. PLN (Persero) Gardu Induk Cibatu, penelitian ini menggunakan 4 metode, yaitu TDCG, *Key Gasses*, *Roger's Ratio*, dan *Duval Triangle*. Hasil dari analisa ini didapati adanya indikasi kegagalan pada transformator berupa *short circuit* sehingga menimbulkan *arching*. Hal ini ditunjukkan dengan munculnya gas asetilen yang dominan (Sihombing, 2020).

Mengacu pada penelitian sebelumnya maka akan dilakukan pengujian pada 3 Transformator tenaga Sub Unit PLTA Cikalong daya sebesar 8 MVA, terkait belum adanya analisa mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi analisis pada uji DGA pada pembangkit ini maka dilakukan penelitian bertujuan untuk mengetahui kondisi minyak transformator pada

Info Makalah:

Dikirim : 10-04-21;
Revisi 1 : 12-23-21;
Revisi 2 : 01-21-22;
Revisi 3 : 02-07-22;
Revisi 2 : 03-07-22;
Diterima : 03-31-22.

Penulis Korespondensi:

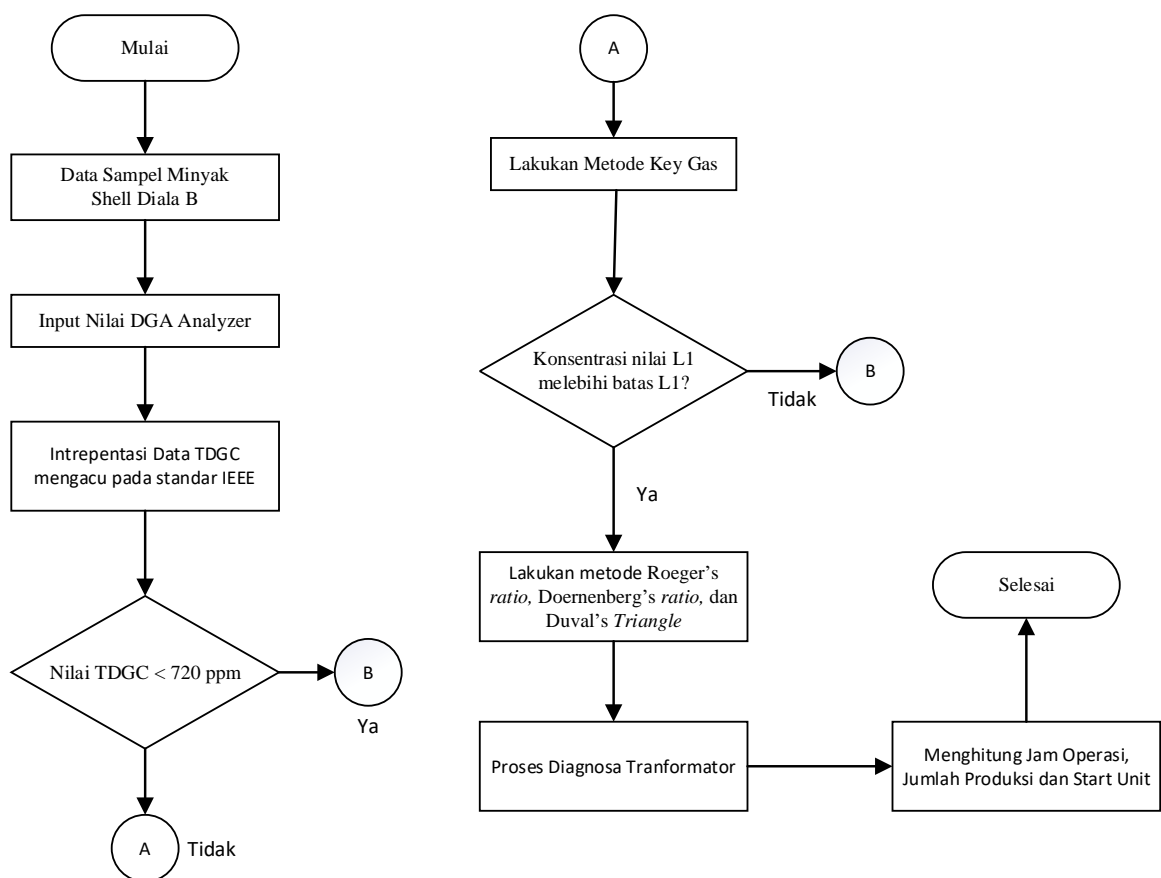
Telp : +62 852-5590-8299
e-mail : fauzia.haz@lecture.unjani.ac.id

sub unit PLTA Cikalong dan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kondisi minyak transformator yang direpresentasikan dalam bentuk nilai TDCG pada hasil uji DGA. Selanjutnya mencari nilai tegangan tembus dan kolerasi antara nilai TDGC yang dihasilkan dengan jumlah produksi daya pada pembangkit, jam operasi, dan jumlah start unit pembangkit terhadap kondisi minyak transformator PLTA Cikalong.

2. Metode

Pada penelitian ini dilakukan pengujian sampel minyak tranformator dimulai dengan menyiapkan wadah untuk menampung tetesan minyak trafo, Pasang *oil flushing unit* pada *drain valve main tank* minyak trafo, Atur stop kran pada posisi menutup, Persiapkan *syringe* untuk pengambilan sampel minyak. Lakukan proses pembersihan/*flushing* terlebih dahulu (keluarkan minyak dari *main tank* trafo dengan membuka stop kran), tutup stop kran, pasang jarum pada *syringe*, Buka katup pada *syringe* dan suntikkan *syringe* pada selang *silicon*, Sedot minyak dari selang, pastikan tidak ada udara (gelembung udara) yang masuk dalam botol *syringe*, tutup kembali katup pada *syringe*, ambil sampel minyak sebanyak 50 ml untuk uji DGA. Lakukan pengambilan sampel minyak dengan proses yang sama untuk minyak *main tank* bagian bawah dan OLTC, beri label *syringe* sampel minyak. Simpan sampel minyak dan lindungi dari panas maupun sinar matahari langsung. Lepaskan jarum suntik dari *syringe*. Tutup kembali *drain valve main tank* trafo. Buka stop kran untuk mengeluarkan sisa minyak pada *oil flushing unit* (tampung dalam wadah). Lepaskan *oil flushing* dari *drain valve main tank* trafo. Pastikan *drain valve* telah terpasang dengan benar. Sampel yang diambil harus segera diuji dengan alat uji DGA Kelman (GE). Pengujian DGA sampel minyak tranformator dilakukan mengacu pada *Standard Operational Procedure No SOPTRANSX-GAE-001* mengenai pengambilan sampel oli dan penggunaan Transport-X DGA Portable.

Agar meningkatkan akurasi keputusan, maka diperlukan pengujian lain terkait kondisi minyak transformator. Pengujian yang dimaksud adalah uji tegangan tembus. Pengujian ini dilakukan oleh PT. Transformator Servis Indonesia. Hasil uji tegangan tembus akan dibandingkan dengan hasil uji gas terlarut. Penelitian terkait analisis kondisi minyak Transformator 1, 2 dan 3 8 MVA 6,3/77 kV Sub Unit PLTA Cikalong ini dimulai pada bulan Maret Tahun 2021 sampai dengan bulan Juni Tahun 2021. Adapun tempat penelitian serta tempat pengambilan data sebagai dasar analisa adalah di PT Indonesia Power Saguling POMU Sub Unit PLTA Cikalong. Alur penelitian dapat lihat pada Gambar 1



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

Berdasarkan Gambar 1 pengambilan sampel minyak transformator unit 1, 2 dan 3 8 MVA 6,3/77 kV pada semua unit untuk mendapatkan kadar nilai gas H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , CO_2 , dan CO yang terlarut pada minyak transformator. Dari hasil ini nantinya akan dilakukan analisa gas terlarut menggunakan metode TDCG, *Key Gas*, Roeger's *ratio*, Doernenberg's *ratio*, dan Duval's *Triangle* untuk mengetahui kondisi dari minyak transformator pada sub unit PLTA Cikalong apakah dalam kondisi baik atau buruk (Iskandar, 2021), sehingga dapat menentukan tindakan pemeliharaan selanjutnya. Metode tersebut dilakukan untuk mendiagnosa kondisi minyak transformator untuk mengetahui kemungkinan kegagalan yang akan timbul. Analisis dilanjutkan dengan mencari nilai tegangan tembus, nilai koefisien kolerasi dan pengaruh jumlah produksi kWh, jam operasi, dan jumlah *start unit* pembangkit terhadap kondisi minyak transformator yang dilihat dari nilai TDCG.

a. *Total Dissolved Combustible Gas*

Analisis jumlah gas terlarut menggunakan metode TDCG akan menggambarkan kondisi minyak transformator berdasarkan standar IEEE C57.104-2008. Nilai TDCG didapatkan dengan menjumlahkan konsentrasi gas-gas diantaranya adalah H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , dan gas CO (Syakur and Lazuardi, 2019). Sehingga perhitungannya adalah:

$$TDCG = H_2 + CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2 + C_2H_6 + CO$$

b. *Key Gas Analysis*

Metode *Key Gas* akan memberikan dasar dalam menentukan jenis gangguan berdasarkan proporsi gas yang signifikan atau dominan (Rahmat, 2008). Untuk menghitung nilai persentase gas terlarut pada metode *Key Gas*, caranya adalah membagi antara nilai gas terlarut dengan nilai TDCG.

c. *Metode Doernenberg and Roger's Ratio*

Metode ini menggunakan 5 gas yaitu, H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 untuk menentukan indikasi penyebab gangguan pada Transformator. Caranya adalah dengan membandingkan gas-gas tersebut sehingga terbentuk 5 rasio dengan rasio 1 (R1) adalah hasil perbandingan $\frac{CH_4}{H_2}$, rasio 2 (R2) adalah $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$, rasio 3 (R3) adalah $\frac{C_2H_2}{CH_4}$, rasio 4 (R4) adalah $\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$, dan rasio 5 (R5) adalah $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$. Rasio Doernenberg menggunakan R1, R2, R3, dan R4 dalam melakukan analisis untuk menentukan indikasi yang menyebabkan kegagalan Transformator. Berikut batas konsentrasi gas terlarut yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas Konsentrasi Gas Terlarut Rasio Doernenberg

Gas	Konsentrasi (ppm)
H_2	100
CH_4	120
CO	350
C_2H_4	50

d. *Metode Segitiga Duval*

Berdasarkan standar IEC 60599, segitiga Duval membagi gangguan menjadi 6 zona. Dalam metode ini, gas yang dijadikan perhitungan adalah CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 (Rahmat, 2008). Dalam segitiga duval, jumlah dari ketiga gas ini adalah 100%, sehingga berikutnya akan didapatkan persentase dari masing-masing gas. Kemudian hasil dari perhitungan persentase ini akan diletakkan pada tiap-tiap sisi segitiga. Selanjutnya ditarik garis lurus dan akan ada titik temu dari ketiga garis tersebut. Lokasi titik temu tersebut menjadi hasil dari analisis menggunakan metode segitiga Duval.

e. *Perhitungan kolerasi*

Untuk menghitung nilai korelasi, maka dapat dilakukan dengan cara mencari nilai rata-rata variabel x yang merupakan nilai TDGC dengan cara menjumlahkan seluruh nilai x kemudian dibagi dengan jumlah data x. Nilai rata-rata kemudian diberi simbol \bar{x} . Hitung nilai rata-rata variabel y adalah jumlah Produksi, dengan cara menjumlahkan seluruh nilai y kemudian dibagi dengan jumlah data y. Nilai rata-rata kemudian diberi simbol \bar{y} atau dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

- Hitung nilai rata-rata variabel x, dengan cara menjumlahkan seluruh nilai x kemudian dibagi dengan jumlah data x. Nilai rata-rata kemudian diberi simbol \bar{x} .
- Hitung nilai rata-rata variabel y, dengan cara menjumlahkan seluruh nilai y kemudian dibagi dengan jumlah data y. Nilai rata-rata kemudian diberi simbol \bar{y} .
- Hitung kuadrat dari $(x - \bar{x})$ kemudian jumlahkan hasilnya.
- Hitung kuadrat dari $(y - \bar{y})$ kemudian jumlahkan hasilnya.
- Hitung perkalian antara $(x - \bar{x})$ dengan $(y - \bar{y})$ kemudian jumlahkan hasilnya.

- Masukkan nilai-nilai tersebut kedalam rumus koefisien korelasi :

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

3. Hasil dan Pembahasan

a. Hasil Uji Menggunakan DGA Analyzer

Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui kadar gas terlarut pada minyak transformator unit 1,2, dan 3 PLTA Cikalong menggunakan alat GE Transport X *Portabel DGA Analysis*. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Gas Terlarut Minyak Transformator Unit 1, 2, dan 3

Senyawa	Nama Gas	Nilai (ppm)		
		Unit 1	Unit 2	Unit 3
H_2	Hidrogen	90,9	7,4	34,7
CH_4	Metana	3,9	3,4	4,2
CO	Karbon Monoksida	204,1	147,6	511,1
CO_2	Karbon Dioksida	3713	5326	6502
C_2H_4	Etilen	9,8	5,3	8,8
C_2H_6	Etana	16,8	11,7	11,6
C_2H_2	Asetilen	0,9	0,2	0

b. Total Dissolved Combustible Gas

Berikut merupakan tabel dan hasil analisis uji DGA pada minyak transformator PLTA Cikalong unit 1, 2, dan 3 menggunakan metode TDCG yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Metode TDCG

Gas	Nilai (ppm)			Std. IEEE C57.104-2008 (Kondisi)			
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	1	2	3	4
H_2	90,9	7,4	34,7	100	101-700	701-1800	>1800
CH_4	3,9	3,4	4,2	120	121-400	401-1000	>1000
CO	204,1	147,6	511,1	350	351-700	571-1400	>1400
CO_2	3713	5326	6502	2500	2500-4000	4001-10000	>10000
C_2H_4	9,8	5,3	8,8	50	51-100	101-200	>200
C_2H_6	16,8	11,7	11,6	65	66-100	101-150	>150
C_2H_2	0,9	0,2	0	1	2-9	10-35	>35
TDGC	326,4	175,6	570,4	720	721-1920	1921-4630	>4630

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa ketiga transformator menunjukkan hasil nilai TDCG yang berada pada kondisi 1 yang berarti semua transformator dalam kondisi baik, sehingga semua transformator dapat dikategorikan sebagai kondisi normal beroperasi. Sesuai prosedur operasi yang tertera pada standar IEEE C57.104-2008, apabila hasil TDCG berada dalam kondisi 1, maka pemantauan selesai dan hasilnya transformator dalam kondisi normal.

c. Key Gas Analysis

Dari hasil perhitungan diatas persentase gas CO_2 tidak tercantum dalam perhitungan dikarenakan sifat gas CO_2 yang bukan merupakan *combustible gas* atau dengan kata lain adalah gas yang tidak mudah terbakar. Persentase gas CO pada unit 2 dan unit 3 yang nilainya lebih dominan dibandingkan gas lain mengindikasikan adanya kerusakan pada isolasi padat seperti kertas, *pressboard*, dan *transformer board*. Oleh karena itu perlu dilakukan pemantauan berkala terhadap perubahan nilai konsentrasi gas CO ini, apabila nilainya semakin naik, maka perlu dilakukan pemeliharaan lebih lanjut dengan membuka *casing* transformator untuk mengetahui kondisi real dari isolasi kertas pada belitan. Apabila benar-benar terjadi *degrading cellulose* atau dengan kata lain kerusakan pada isolasi kertas, maka sebagai solusi dari kerusakan pada isolasi kertas seperti diatas adalah dengan melakukan reisolasi kembali pada isolasi belitan transformator agar dapat kembali berfungsi sebagai isolator yang baik.

d. Metode Doernenberg and Roger's Ratio

Pada metode ini, sesuai standar IEEE C57.104-2008 gas yang akan dianalisis nilainya harus melebihi atau bahkan 2x dari nilai yang tertera pada Tabel 1 (Ghoneim, 2018). Apabila merujuk pada tabel tersebut, yang berisikan tentang konsentrasi gas terlarut pada minyak transformator unit 1, 2 dan 3 kemudian nilainya dibandingkan dengan batas konsentrasi gas terlarut untuk metode *rasio Doernenberg's*, maka analisis untuk menentukan indikasi yang menyebabkan kegagalan transformator menggunakan metode ini tidak dapat dilakukan. Hal ini dikarenakan,

konsentrasi yang nilainya belum melebihi batas konsentrasi gas terlarut. Dengan kata lain, kondisi minyak transformator unit 1,2 dan 3 berada pada kondisi normal dan tidak ada kegagalan apabila dianalisis menggunakan metode rasio Doernenberg. Berbeda dengan metode rasio Doernenberg, metode rasio Roger menggunakan R1, R2, dan R5 dalam melakukan analisis untuk mengetahui indikasi penyebab kegagalan pada transformator (A. R. Demmassabu, L. S. Patras, 2014). Hasil perhitungan rasio Roger unit 1, 2 dan 3 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Rasio Roger pada Unit 1, 2 dan 3.

Rasio Roger unit 1		Rasio Roger Unit 2		Rasio Roger Unit 3	
R1	0,04	R1	0,46	R1	0,12
R2	0,09	R2	0,03	R2	0
R5	0,58	R5	0,45	R5	0,75

Agar dapat dilakukan diagnosis terhadap hasil perhitungan pada tabel 4, maka Tabel 5 menunjukkan rasio Roger yang berisikan tentang hubungan antara rasio R1, R2 dan R5 terhadap diagnosis kegagalan.

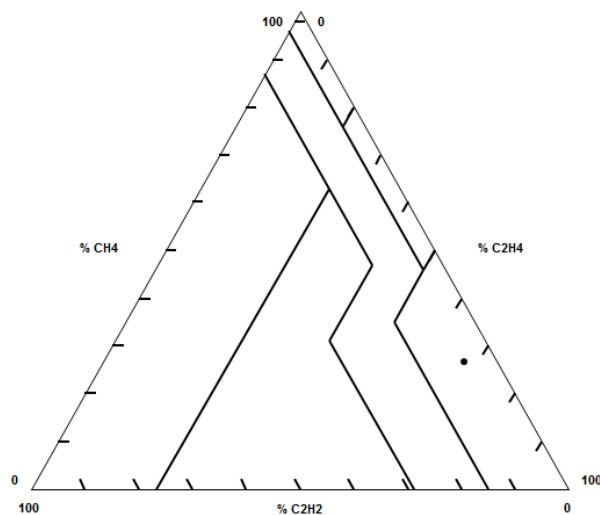
Tabel 5. Metode Rasio Roger

Case	R2 C_2H_2/C_2H_4	R1 CH_4/H_2	R5 C_2H_4/C_2H_6	Suggested Fault Diagnosis
0	<0.1	>0.1 to <1.0	<1.0	Unit Normal
1	<0.1	<0.1	<1.0	Low- Energy Density arcing - PD ^a
2	0.1 to 3.0	0.1 to 1.0	>3.0	Arching –High Energy Discharge
3	<0.1	>1.0 to <1.0	1.0 to 3.0	Low Temperature Thermal
4	<0.1	>1.0	1.0 to 3.0	Thermal <700 °C
5	<0.1	>1.0	>3.0	Thermal >700 °C

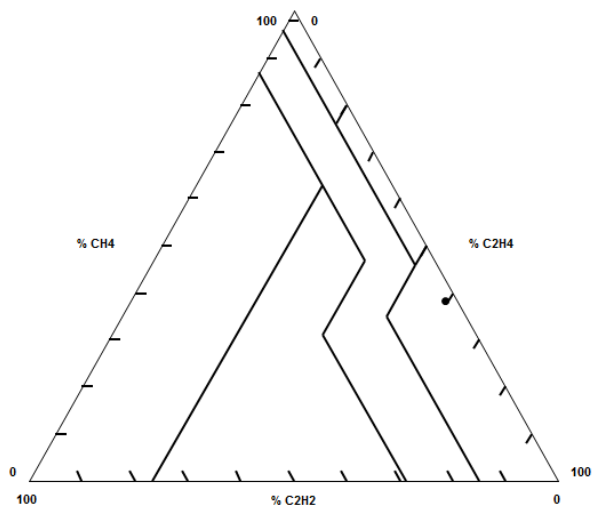
Dari hasil perhitungan yang sebelumnya telah dilakukan kemudian dibandingkan dengan tabel metode rasio roger dapat dilakukan diagnosis terhadap minyak transformator untuk mengetahui indikasi gangguan pada transformator. Pada unit 1, hasil perhitungan rasio R2, R1, dan R5 berada pada case 1, hasil tersebut menunjukkan diagnosis gangguannya adalah *low energy density arcing* atau bisa juga disebut sebagai *partial discharge*. Hal ini dapat disebabkan oleh penuaan pada isolasi akibat menahan *thermal stress* ataupun *electrical stress* yang terus menerus sehingga mengakibatkan terjadinya pelepasan muatan bunga api listrik. Pada unit 2, hasil perhitungan rasio R2, R1, dan R5 berada pada case 0, tidak terdapat indikasi adanya gangguan pada transformator tersebut. Sedangkan pada unit 3, hasil perhitungan rasio R2, R1, dan R5 juga mengarah pada case 0, yang artinya transformator dalam kondisi normal beroperasi. Rasio Roger tidak serta merta dapat dijadikan acuan dalam melakukan analisis terhadap kondisi minyak transformator. Perlu adanya analisis menggunakan metode lain agar dapat dibandingkan untuk mendapatkan hasil analisis yang akurat.

e. Metode Segitiga Duval

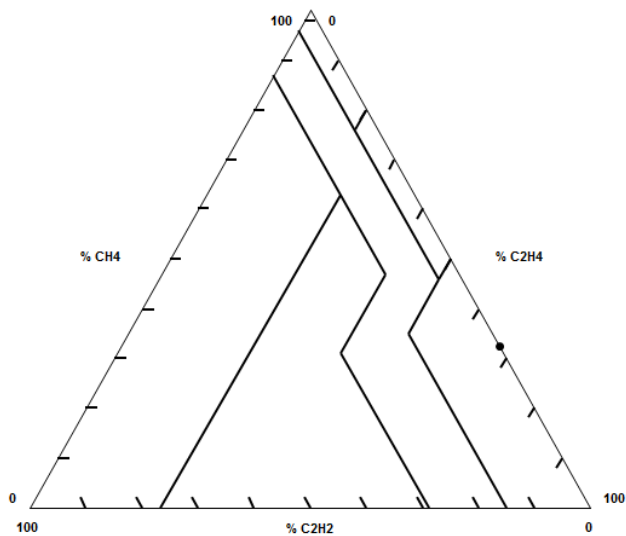
Berdasarkan standar IEC 60599, segitiga Duval membagi gangguan menjadi 6 zona. Dalam metode ini, gas yang dijadikan perhitungan adalah CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 . Dalam segitiga duval, jumlah dari ketiga gas ini adalah 100%, sehingga nantinya akan didapatkan persentase dari masing-masing gas. Kemudian hasil dari perhitungan persentase ini akan diletakkan pada tiap-tiap sisi segitiga. Selanjutnya ditarik garis lurus dan akan ada titik temu dari ketiga garis tersebut. Lokasi titik temu tersebut menjadi hasil dari analisis menggunakan metode segitiga Duval. Berikut merupakan hasil perhitungan persentase gas CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 serta segitiga Duval pada unit 1, 2, dan 3 yang ditunjukkan pada Gambar 2 s.d Gambar 4.



Gambar 2. Segitiga Duval Unit 1



Gambar 3. Segitiga Duval Unit 2



Gambar 4. Segitiga Duval unit 3

f. Perbandingan Hasil Uji DGA dengan Uji Tegangan Tembus

Menurut standar PLN yaitu SPLN 49-1: 1982, nilai standar tegangan tembus untuk minyak isolasi pakai adalah : pada peralatan dengan tegangan ≥ 170 kV batas yang diperbolehkan ≥ 50 kV/2,5 mm, peralatan dengan tegangan 70-170 kV batas yang diperbolehkan ≥ 40 kV/2,5 mm, dan untuk peralatan dengan tegangan ≤ 70 kV batas yang diperbolehkan ≥ 30 kV/2,5 mm. Berikut adalah hasil pengujian tegangan tembus pada trafo 1, 2, dan 3 PLTA Cikalong yang ditunjukkan pada Tabel 6 s.d Tabel 8.

Tabel 6. Hasil Uji Tegangan Tembus Trafo 1

Customer Name:	PT Indoensia Power UP Saguling			Lab Ref No:	L0561/TR/2020		
Project:	PLTA Cikalong			Date:	25/08/2020		
Transformer data							
Unit ID:	Trafo 1 Cikalong			Oil Volume:	-		
Serial Number:	-			Oil Brand:	-		
Rating:	- kVA			Sample Point:	Bottom		
Voltage:	- kV			Sample Date:	03/08/2020		
Manufacture/Year:	Savoisienne / 1955			Oil Temperature °C:	54		
OIL QUALITY ANALYSIS OF TRANSFORMER OILS							
Sampling Date				26-Mar-19	03-Aug-20	Normal	
Received Date				01-Apr-19	06-Aug-20		
Test Date				03-Apr-19	07-Aug-20		
Gas Parameter	Unit	Method	1st	2nd	IEC 60422		
					Min Limit	Max Limit	
Oil Colour/Appearance	-	ASTM D-1500	1.0 / Yellow	1.0 / Yellow	-	-	
Water Content	mg/kg	IEC 60814	24	25.2	-	30	
Acidity	mgKOH/g	IEC 62021-2	0.01	0.01	-	0.2	
Interfacial Tension	mN/m	ASTM D971	39.5	39.2	22	-	
Oil Quality Index	-	WP 222	3950	3920	160	-	
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	40.9	32.9	40	-	
Flash Point PMCC	°C	ASTM D 93	143	143	135	-	
Sediment Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	-	0.02	
Sludge Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	-	0.02	

Tabel 7. Hasil Uji Tegangan Tembus Trafo 2

Customer Name:	PT Indoensia Power UP Saguling			Lab Ref No:	L0562/TR/2020		
Project:	PLTA Cikalong			Date:	25/08/2020		
Transformer data							
Unit ID:	Trafo 2 Cikalong			Oil Volume:	4500 Kg		
Serial Number:	C594			Oil Brand:	-		
Rating:	8000 kVA			Sample Point:	Bottom		
Voltage:	6.3 / 77 kV			Sample Date:	03/08/2020		
Manufacture/Year:	Savoisienne / 1955			Oil Temperature °C:	Off		
OIL QUALITY ANALYSIS OF TRANSFORMER OILS							
Sampling Date				25-Mar-19	03-Aug-20	Normal	
Received Date				01-Apr-19	06-Aug-20		
Test Date				02-Apr-19	07-Aug-20		
Gas Parameter	Unit	Method	1st	2nd	IEC 60422		
					Min Limit	Max Limit	
Oil Colour/Appearance	-	ASTM D-1500	0.5 / P Yellow	1.0 / Yellow	-	-	
Water Content	mg/kg	IEC 60814	8	8.4	-	30	
Acidity	mgKOH/g	IEC 62021-2	0.01	0.01	-	0.2	
Interfacial Tension	mN/m	ASTM D971	40	40.2	22	-	
Oil Quality Index	-	WP 222	4000	4020	160	-	
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	74.1	72.5	40	-	
Flash Point PMCC	°C	ASTM D 93	144	144	135	-	
Sediment Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	-	0.02	
Sludge Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	-	0.02	

Tabel 8. Hasil Uji Tegangan Tembus Trafo 3

Customer Name:	PT Indoensia Power UP Saguling		Lab Ref No:	L0563/TR/2020	
Project:	PLTA Cikalong		Date:	25/08/2020	
Transformer data					
Unit ID:	Trafo 3 Cikalong		Oil Volume:	4500 Kg	
Serial Number:	C596		Oil Brand:	-	
Rating:	8000 kVA		Sample Point:	Bottom	
Voltage:	6.3 / 77 kV		Sample Date:	03/08/2020	
Manufacture/Year:	Savoisienne / 1955		Oil Temperature °C:	Off	
OIL QUALITY ANALYSIS OF TRANSFORMER OILS					
Sampling Date	26-Mar-19		03-Aug-20		
Received Date	01-Apr-19		06-Aug-20	Normal	
Test Date	03-Apr-19		07-Aug-20	IEC 60422	
Gas Parameter	Unit	Method	1st	2nd	
Oil Colour/Appearance	-	ASTM D-1500	3.0 / L Brown	3.0 / L Brown	
Water Content	mg/kg	IEC 60814	12	12.4	
Acidity	mgKOH/g	IEC 62021-2	0.04	0.04	
Interfacial Tension	mN/m	ASTM D971	28.6	28.4	
Oil Quality Index	-	WP 222	715	710	
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	65.5	61.2	
Flash Point PMCC	°C	ASTM D 93	140	140	
Sediment Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	
Sludge Content	%w/w	ASTM D 473	< 0.01	< 0.01	
					Min Limit Max Limit
					- -
					- 30
					- 0.2
					22 -
					160 -
					40 -
					135 -
					- 0.02
					- 0.02

Dari hasil pengujian tegangan tembus diatas dapat dilihat bahwa untuk Transformator Unit 1 mempunyai nilai tegangan tembus paling rendah yaitu 32,9 kV. Sesuai standar IEC 60422, nilai ini masuk ke dalam kategori *poor*. Sebagai masukan, maka perlu dilakukan pengujian lebih sering dan juga dibandingkan dengan pengetesan menggunakan metode lain. Apabila hasilnya juga menunjukkan kondisi buruk maka minyak trafo perlu direkondisi, bisa dilakukan penggantian ataupun pemurnian kembali (purifikasi). Sedangkan untuk trafo 2 dan trafo 3, hasil uji tegangan tembus berada diatas nilai standar, artinya kondisi minyak trafo berada dalam kategori normal. Merujuk pada hasil pengujian dengan metode DGA, pada unit 1 memang terdapat indikasi gangguan yaitu adanya kerusakan pada isolasi padat dan adanya *partial discharge*. Adanya indikasi gangguan ini dapat disebabkan oleh tegangan tembus yang rendah. Artinya apabila terjadi percikan didalam trafo maka akan mudah menyebabkan degradasi pada minyak trafo sehingga kualitas minyak isolasi akan menurun. Hal ini juga mengakibatkan munculnya gas-gas terlarut akibat rantai hidrokarbon yang terdekomposisi.

g. Korelasi Jumlah Produksi kWh, Jam Operasi, dan Jumlah Start Unit terhadap nilai TDCG

Korelasi antara jumlah produksi kWh, jam operasi, dan jumlah start unit terhadap kondisi minyak transformator yang dinyatakan dalam bentuk nilai TDCG. Koefisien korelasi bernilai antara -1 sampai dengan 1. Tanda positif menandakan adanya hubungan yang linear sedangkan tanda negatif menandakan hubungan berbanding terbalik. Apabila nilai korelasi mendekati 1, maka antar dua variabel tersebut memiliki hubungan linear yang erat. Sebaliknya, apabila nilainya kurang dari 1 atau mendekati 0, maka antar dua variabel tersebut tidak saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya (Suardi Yakub, 2012). Berikut merupakan Tabel 9 yang memuat variabel TDCG dengan jumlah produksi kWh, jam operasi, dan jumlah *start* unit.

Tabel 9. Data TDCG dan Pengusahaan PLTA Cikalong

Unit	TDCG	Produksi kWh	Jam Operasi	Jumlah Start
Unit 1 (Sep 16 – Mar 17)	176	10.095.030	2960:25:00	149
Unit 2 (Sep 16 – Mar 17)	249,7	8.887.725	2952:25:00	120
Unit 3 (Sep 16 – Mar 17)	502,8	10.498.455	3518:44:00	61
Unit 1 (Apr 17 – Jan 18)	862	15.117.895	3976:31:00	141
Unit 2 (Apr 17 – Jan 18)	276	12.564.585	3702:12:00	152
Unit 3 (Apr 17 - Jan 18)	494	11.334.015	3174:12:00	64
Unit 1 (Feb 18 - Jan 19)	276	19.966.320	5734:00:00	102
Unit 2 (Feb 18 - Jan 19)	285	18.435.978	4392:45:00	23
Unit 3 (Feb 18 - Jan 19)	541	12.264.159	3629:00:00	90
Unit 1 (Feb 19 - Sep 19)	325,1	18.160.362	3880:57:00	191
Unit 2 (Feb 19 - Sep 19)	195,9	8.553.132	308:20:00	22
Unit 3 (Feb 19 - Sep 19)	430,6	12.282.435	3332:11:00	50
Unit 1 (Okt 19 - Apr 20)	326,4	8.281.548	2450:20:00	142
Unit 2 (Okt 19 - Apr 20)	175,6	2.573.010	843:30:00	92
Unit 3 (Okt 19 - Apr 20)	570,4	12.788.622	2611:33:00	76

Dengan menggunakan rumus 1 maka kolerasi TDGC terhadap jumlah produksi, jam operasi dan jumlah star unit dapat dilihat pada Tabel 10 :

Tabel 10. Nilai kolerasi TDGC

Kolerasi TDGC	Nilai
jumlah start unit	0,267
Jam operasi	0,297
Star unit	-0,00013

h. Korelasi TDCG dengan jumlah produksi

Koefisien korelasi antara TDCG dengan jumlah produksi adalah 0,267. Artinya antara dua variabel ini memiliki korelasi yang rendah dengan jumlah produksi terhadap nilai TDCG memiliki pengaruh yang kecil dan memiliki hubungan yang sifatnya berbanding lurus karena koefisien korelasinya bernilai positif. Hal ini sesuai dengan teori kekuatan koefisien korelasi yaitu apabila nilai koefisien korelasi bernilai mendekati 1 maka kekuatan hubungan antara varial x dengan variabel y mempunyai hubungan sangat kuat dan positif, namun ketika nilainya kurang dari 1, maka hubungan antara variabel x dengan variabel y bernilai lemah namun tetap positif. Jumlah produksi kWh pada pembahasan ini mengarah kepada pembebanan, sehingga apabila pada unit pembangkit melakukan pembebanan atau membangkitkan daya dengan nilai yang besar atau kecil, maka hal itu tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap minyak transformator. Namun perlu diketahui juga bahwasanya pembebanan dapat mempengaruhi temperatur belitan transformator karena semakin tinggi beban atau daya yang dibangkitkan maka temperatur belitan Transformator juga akan semakin meningkat.

i. Korelasi TDCG dengan jam operasi

Koefisien korelasi antara TDCG dengan jumlah produksi adalah 0,297. Artinya antara dua variabel ini memiliki korelasi yang rendah karena jam operasi terhadap nilai TDCG memiliki pengaruh yang kecil dan memiliki hubungan yang sifatnya berbanding lurus karena koefisien korelasinya bernilai positif. Hal ini sesuai dengan teori kekuatan koefisien korelasi yaitu apabila nilai koefisien korelasi bernilai mendekati 1 maka kekuatan hubungan antara varial x dengan variabel y mempunyai hubungan sangat kuat dan positif, namun ketika nilainya kurang dari 1, maka hubungan antara variabel x dengan variabel y bernilai lemah namun tetap positif. Dalam kasus ini dapat dilihat jumlah jam operasi transformator mempunyai jumlah yang cukup besar, maka hal ini tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai TDCG. Sehingga transformator dapat dioperasikan secara normal sesuai dengan rencana operasi pembangkit namun tetap dengan pemeliharaan yang rutin.

j. Korelasi TDCG dengan jumlah start unitf

Koefisien korelasi antara TDCG dengan jumlah produksi adalah $-0,00013$. Artinya antara dua variabel ini dapat dikatakan tidak mempunyai korelasi karena nilai koefisien korelasinya mendekati 0. Hal ini sesuai dengan teori kekuatan koefisien korelasi yaitu apabila nilai koefisien korelasi bernilai mendekati 1 maka kekuatan hubungan antara varial x dengan variabel y mempunyai hubungan sangat kuat dan positif, namun ketika nilainya kurang dari 1 dan mendekati atau sama dengan 0, maka hubungan antara variabel x dengan variabel y bernilai lemah atau tidak mempunya hubungan. Dalam hal ini, jumlah start unit pembangkit sama sekali tidak memberikan pengaruh terhadap nilai TDCG atau dapat dikatan tidak berpengaruh terhadap kondisi dari minyak transformator.

Kesimpulan

Nilai TDCG pada semua unit transformator berada pada kondisi 1, yang artinya dalam kondisi normal sesuai standar IEEE C57.104-2008. namun terdapat indikasi adanya degradasi *cellulose* pada unit 2 dan 3, dan partial discharge pada unit 1. Pada Metode *Roger's ratio*, didapat bahwa transformator unit 1 berada pada *case* 1 yang mengindikasikan adanya partial *discharge*, sedangkan unit 2 dan 3 berada pada *case* 0 yang berarti dalam kondisi normal. Transformator Unit 1 mempunyai nilai tegangan tembus paling rendah yaitu 32,9 kV, berdasarkan standar IEC 60422 nilai ini masuk ke dalam kategori *poor*. Nilai koefisien korelasi antara jam operasi dan jumlah produksi kWh dengan TDCG masing-masing sebesar 0,267 dan 0,297 yang menandakan hubungan antara variabel tersebut merupakan hubungan yang lemah, nilai mendekati 1 menunjukkan nilai yang kuat. Nilai koefisien korelasi antara jumlah start unit pembangkit dengan TDCG sebesar 0,00013 yang artinya kedua variabel ini tidak memiliki hubungan karena nilainya kurang dari 0. Daya yang dibangkitkan dapat mencapai nilai maksimum karena transformator dalam kondisi baik dan normal. Hal ini membuktikan bahwa setiap metode tidak bisa dijadikan acuan terhadap kondisi minyak tranformator, karena masing-masing metode menghasilkan indikasi yang beda-beda.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih PT. Indonesia Power Saguling POMU Sub Unit PLTA Cikalong atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan dosen Teknik elektro atas diskusinya yang bermanfaat.

Daftar Notasi

r = koefisien korelasi

x = nilai TDGC

y = jumlah produksi

Daftar Pustaka

- A Dedi Roi Candra Sihombing, “Analisa Kondisi Minyak Isolasi Transformator Berdasarkan Pengujian DGA Pada Transformator 3 150/20 kV 60 MVA PT. PLN (Persero) Gardu Induk Cibatu” 2020.
- A. R. Demmassabu, L. S. Patras, F. Lisi, “Analisis Kegagalan Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Dengan Metode TDCG, Key Gas, Roger's Ratio, Duval's Triangle Pada Gardu Induk” eJurnal Teknik Elektro dan Komputer, ISSN : 2301-8402. 2014.
- Faris Aljiddi, “Analisis Hasil Uji DGA untuk Memprediksi Rentang Waktu Purifikasi Minyak Transformator dengan Metode TDCG dan Roger's Ratio” 2019.
- Haz, F. and Aditya, I. (2020) ‘Analisis Setting Proteksi Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Transformator Daya 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Cibatu’, *Journal of Electrical Engineering and Information Technology*
- Hidayat, M. R. *et al.* (2020) ‘Analisis Kemampuan Minyak Isolasi Transformator Daya Merek Unindo Dengan Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Breakdown Voltage di Gardu Induk Serpong’, *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information*, pp. 100–106.
- Pramono, A., Haddin, M. and Nugroho, D. (2016) ‘Analisis Minyak Transformator Daya Berdasarkan Dissolved Gas Analysis (Dga) Menggunakan Data Mining Dengan Algoritma J48’, *Telematika*, 9(2), p. 78. doi: 10.35671/telematika.v9i2.457.
- IEEE std. C57.104-2008, *IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer*. 2008.
- P, A. Y. C., Taqiyyudin, M. A. and Basuki, B. M. (2018) ‘Analisis Kegagalan Transformator Berdasarkan Hasil Pengujian Dissolved’.
- Rahmat Hardityo, “Deteksi dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator Dengan Metode Analisis Gas Terlarut” 2008.
- Suardi Yakub, Modul Panduan Belajar Statistik Probabilitas. 2012.
- Syakur, A. and Lazuardi, W. (2019) ‘Penerapan Metode Interpretasi Rasio Roger , Segitiga Duval , Breakdown Test , dan Water Content Test untuk Diagnosis Kelayakan Minyak Transformator’, *Teknik*, 40(1), pp. 63–68. doi: 10.14710/teknik.v40n1.22056.
- Iskandar, H. R. (2021) ‘Studi Kelayakan Operasi Berdasarkan Uji Dissolve Gas Analysis pada Transformator Distribusi 150 kV Gardu Induk Cibabat Cimahi’, *Kilat*, 10(1), pp. 10–21. doi: 10.33322/kilat.v10i1.963.

Perancangan Antena Mikrostrip Frekuensi Ganda Menggunakan Metode Y Slot untuk Sistem Komunikasi 5G dan WiFi

Wiratul Usrah¹, Syah Alam¹, dan Indra Surjati¹

¹ Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, DKI Jakarta, Indonesia

wiratulusrah@gmail.com, syah.alam@trisakti.ac.id, indra@trisakti.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan perancangan antena mikrostrip frekuensi ganda (*dual band*) dengan menggunakan metode Y slot. Antena dirancang dengan frekuensi kerja 3,5 GHz untuk sistem komunikasi 5G dan 5 GHz untuk WiFi dengan menggunakan substrat RT Duroid 5880 dengan nilai konstanta dielektrik 2,2, ketebalan 1,575 mm dan *loss tangent* 0,0009. Metode Y slot digunakan untuk menghasilkan antena yang dapat bekerja pada frekuensi ganda (*dual band*) dan kemudian menambahkan *inset feed* pada antena dengan tujuan agar dapat mengoptimasi nilai *return loss* dari antena yang diusulkan. Dari perancangan dan simulasi telah berhasil diperoleh antena yang dapat bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz. Penambahan *inset feed* pada antena menghasilkan nilai *return loss* untuk frekuensi 3,5 GHz yaitu -17,86 dB dan frekuensi 5 GHz yaitu -36,27 dB. Penambahan *inset feed* pada desain antena menggunakan metode Y slot berhasil mengoptimasi nilai *return loss* pada frekuensi 5 GHz sebesar 54,34% dibandingkan dengan antena elemen tunggal.

Kata kunci: Antena, Mikrostrip, Y Slot, Dual Band

Abstract

This research proposes the design of dual-frequency microstrip antenna using the Y slot method. Antenna are designed with a working frequency of 3,5 GHz for 5G and 5 GHz communication systems for Wi-Fi using RT duroid 5880 substrates with a constant value in electricity of 2,2, a thickness of 1,575 mm and a loss of tangents of 0,009. The Y slot method is used to generate antenna that can work on dual bands and then add *inset feed* to the antenna in order to optimize the *return loss* value of the proposed antenna. From the design and simulation has been successfully obtained antennas that can work at frequencies 3,5 GHz and 5 GHz. The addition of *inset feed* on the antenna results in a *return loss* value for the frequency of 3,5 GHz which is -17,86 dB and a frequency of 5 GHz which is -36,27 dB. *Inset feed* renching on antenna design using Y slot method successfully optimizes *return loss* value at 5 GHz frequency of 54,34% compared with single element antenna.

Keywords: Antenna, Microstrip, Y slot, dual band

1. Pendahuluan

Teknologi seluler terus berkembang dengan pesat seiring dengan berjalannya waktu. Kecepatan dalam mengakses data sangat dibutuhkan di era ini, namun teknologi 4G yang digunakan sekarang belum maksimal, sehingga muncul generasi 5G untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Frekuensi kerja generasi 5G ini dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu *low band* spektrum pada frekuensi di bawah 1 GHz, *mid band* Spektrum antara 1 dan 6 GHz dan *high band* (mmWave) frekuensi di atas 24 GHz (Hikmaturokhman et al., 2018). Jaringan 5G akan memungkinkan kecepatan tinggi dan latensi rendah yang baru untuk berbagai aplikasi *broadband* nirkabel seperti internet dan inovasi lainnya (Hongwei & Guangli, 2018). Selain itu, sistem komunikasi WiFi juga diperlukan untuk proses penerimaan data. Pada IEEE generasi ke lima yang merupakan penerus standar teknologi Wi-Fi yaitu IEEE 802.11ac memiliki peningkatan penggunaan WLAN dengan menyediakan kecepatan *data rates* hingga 7 Gbps dengan pita frekuensi 5 GHz sehingga dapat diperoleh kecepatan sepuluh kali lebih cepat dari standar yang telah dikeluarkan sebelumnya (Azmi, 2015). Saat ini kebutuhan akan komunikasi nirkabel semakin meningkat, tetapi ketersediaan spektrum frekuensi berbanding terbalik dengan kebutuhan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, maka diperlukan antena penerima yang mampu bekerja di beberapa rentang frekuensi kerja berbeda. Salah satu antena yang memiliki kemampuan bekerja di beberapa frekuensi kerja adalah antena mikrostrip (Alam et al., 2020). Antena mikrostrip adalah jenis antena dengan banyak keunggulan, sehingga banyak digunakan dalam berbagai komunikasi *wireless*, diantaranya bentuk yang kecil, mampu bekerja pada beberapa rentang frekuensi berbeda dan *low cost* (Alam et al., 2020).

Pengembangan antena mikrostrip untuk sistem komunikasi 5G yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz telah dipaparkan pada penelitian sebelumnya (PARAGYA & SISWONO, 2020; Sumpena et al., 2020), namun dari kedua penelitian tersebut antena hanya dirancang untuk bekerja pada satu frekuensi kerja saja yaitu 3,5 GHz sehingga tidak dapat digunakan untuk sistem komunikasi yang berbeda. Penelitian (Hanafiah et al., 2016; Rhee, 2016; Wali et al., 2014) telah berhasil merancang antena mikrostrip frekuensi ganda yaitu dengan menggunakan metode *slot* tunggal dan metode Y slot dan didapatkan bahwa

Info Makalah:

Dikirim : 08-14-21;
Revisi 1 : 09-25-21;
Revisi 2 : 10-30-21;
Revisi 3 : 03-23-22;
Diterima : 04-04-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 857-1140-1211
e-mail : syah.alam@trisakti.ac.id

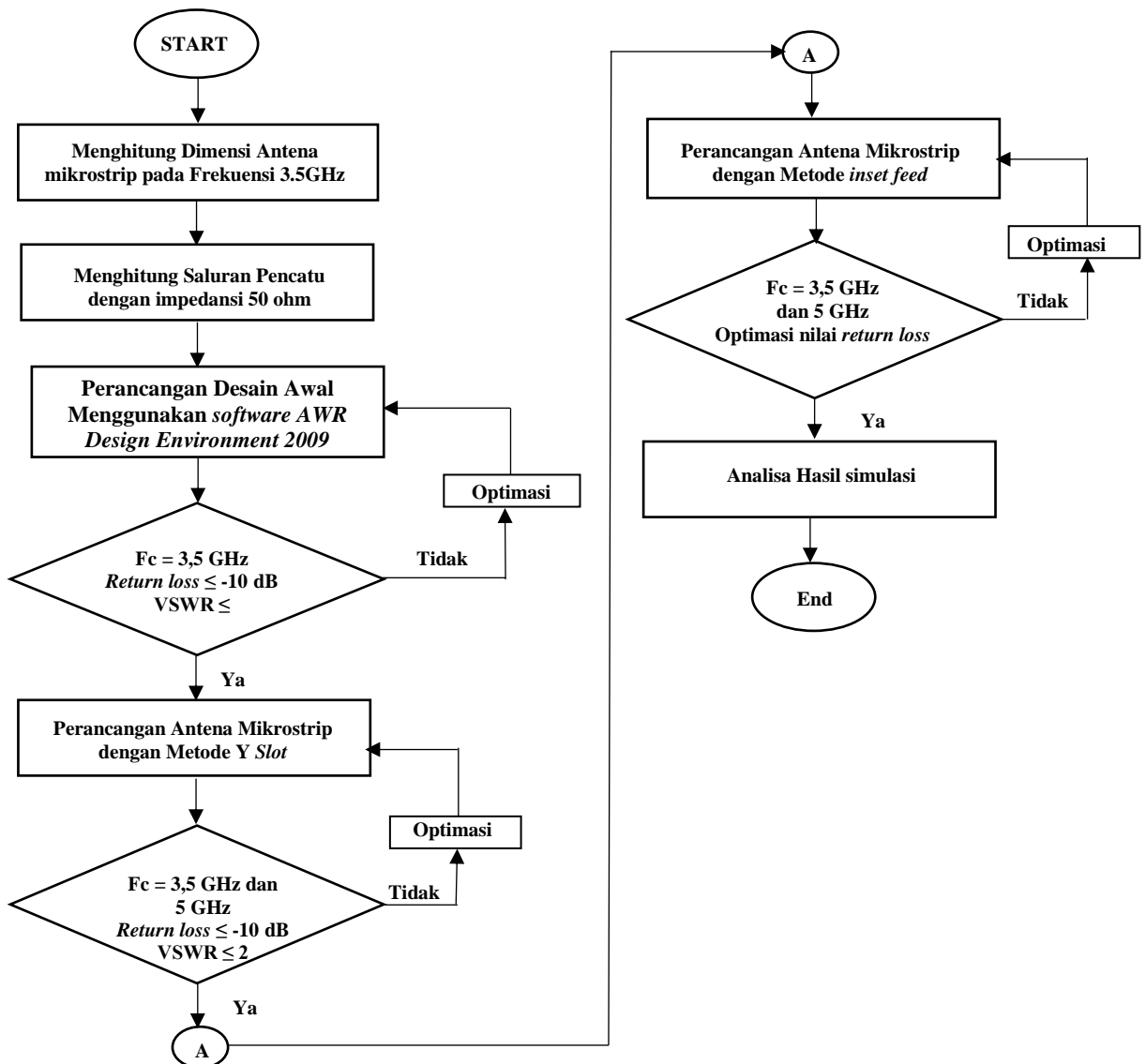
dengan menggunakan metode penambahan Y slot pada antena memiliki nilai *return loss* yang paling kecil untuk kedua frekuensi yang dihasilkan. Semakin kecil nilai *return loss* yang dihasilkan oleh antena maka semakin baik performa dari antena.

Penelitian ini mengembangkan dari penelitian terdahulu (PARAGYA & SISWONO, 2020) (Sumpena et al., 2020) yang menghasilkan antena mikrostrip untuk sistem komunikasi 5G yang hanya bekerja pada satu frekuensi saja dengan menggunakan metode Y slot (Wali et al., 2014) sehingga menghasilkan frekuensi ganda dan menambahkan *inset feed* untuk optimasi *return loss* (Darmawan et al., 2018). Penelitian diharapkan dapat menghasilkan frekuensi kerja 3,5 GHz dan 5 GHz yang dapat bekerja pada sistem komunikasi 5G dan WiFi.

2. Metodologi

Pada penelitian dilakukan beberapa tahap untuk proses perancangan antena yang diusulkan. Tahapan awal yaitu merancang antena *single band* yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz, setelah disimulasikan dengan menggunakan *Software AWR* dan diperoleh frekuensi kerja sesuai yang diusulkan maka tahapan selanjutnya yaitu menambahkan Y slot pada antena *single band* agar dapat menghasilkan antena dengan frekuensi ganda (*dual band*) yaitu bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz. Pada tahap ini dilakukan iterasi agar diperoleh antena yang dapat bekerja pada frekuensi yang diusulkan dan tahap terakhir menambahkan *inset feed* pada antena yang memiliki tujuan agar dapat mengoptimasi nilai *return loss* dari antena yang diusulkan.

Berikut diagram alir proses perancangan desain antena mikrostrip frekuensi ganda dengan menggunakan metode Y slot untuk sistem komunikasi 5G dan Wi-Fi dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Antena

3. Hasil dan Pembahasan

Perancangan tahap awal yaitu merancang desain awal antenna yang dapat bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dengan menggunakan substrat Duroid RT 5880 dengan spesifikasi yang terdapat pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Substrat *Rogers RT/duroid 5880*

Jenis Substrat	<i>Rogers RT/duroid 5880</i>
Konstanta dielektrik (ϵ_r)	2,2
Loss tangent ($\tan \delta$)	0,0009
Ketebalan substrat (h)	1,575 mm

Pada perancangan awal antenna mikrostrip terlebih dahulu menentukan dimensi antenna yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Bentuk antenna yang diusulkan adalah persegi panjang dengan nilai lebar (W) dan panjang (L). Dimensi antenna diperoleh dengan menggunakan persamaan (1) (2) (3) (4) dan (5) sedangkan untuk pencatu pada persamaan (6) dan (7) (Alam & I.G.N.Y, 2017).

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \quad (1)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3)$$

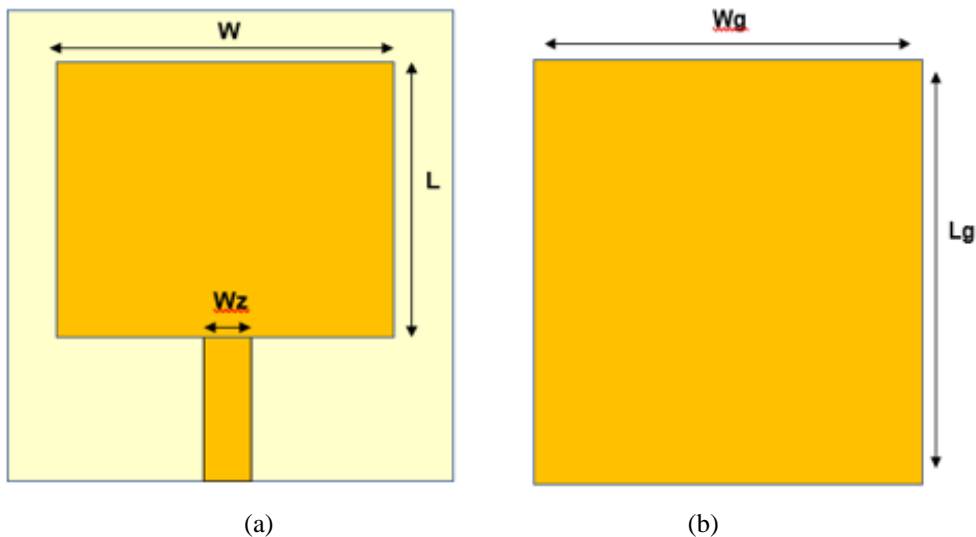
$$\Delta L = 0.412 \times h \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (4)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$Wz = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r}{2\epsilon_r} \left[\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (6)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (7)$$

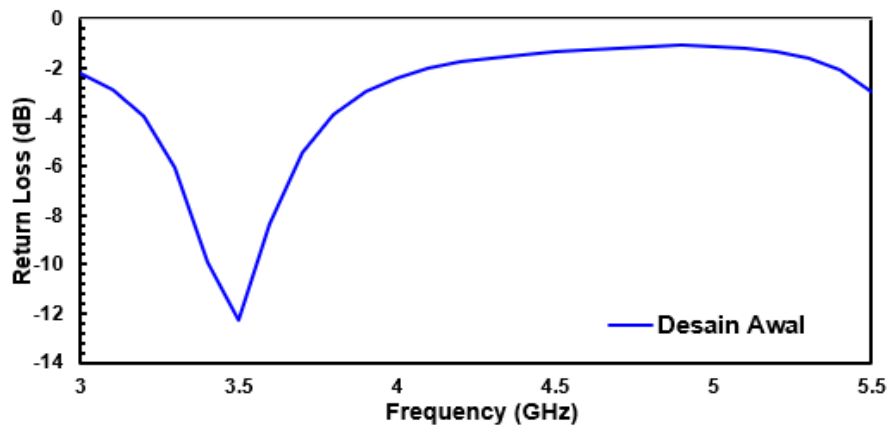
Setelah diperoleh Lebar *patch* (W) dan panjang *patch* (L) serta lebar saluran pencatu antenna (Wz) diperoleh desain antenna yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Desain Awal Antena (a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

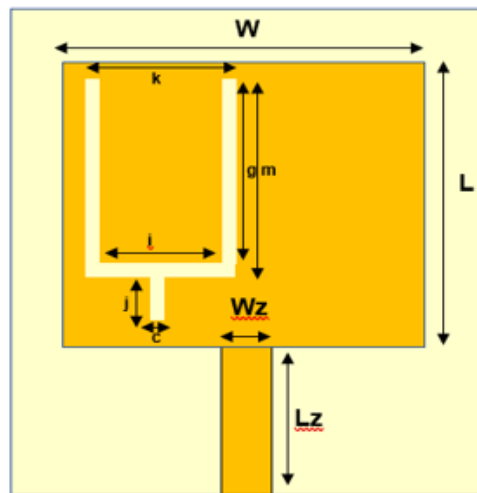
Gambar 2 menunjukkan desain awal antenna mikrostrip dengan nilai $W = 34$ mm dan $L = 28$ mm dengan lebar saluran pencatu Wz sebesar 5 mm dan panjang saluran pencatu 17 mm. Dimensi panjang dan lebar dari substrat yang digunakan 50 mm \times 50 mm.

Selanjutnya antenna disimulasikan dengan menggunakan *Software AWR Design Environment* dan diperoleh antenna yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan memiliki nilai *return loss* -12,26 dB. Hasil simulasi nilai *return loss* dapat dilihat pada gambar 3. Antena yang dihasilkan pada desain awal hanya bekerja pada satu frekuensi yaitu 3,5 GHz.



Gambar 3. Hasil Simulasi Nilai *Return Loss* Desain Awal Antena

Selanjutnya perlu dilakukan tahapan optimasi dengan menggunakan metode *Y slot* agar antena dapat bekerja pada frekuensi ganda (*dual band*) yaitu pada frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz. Desain Antena mikrostrip dengan menggunakan metode *Y slot* dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Desain Antena Mikrostrip dengan Menggunakan Metode *Y Slot*

Tabel 2. Dimensi *Y Slot*

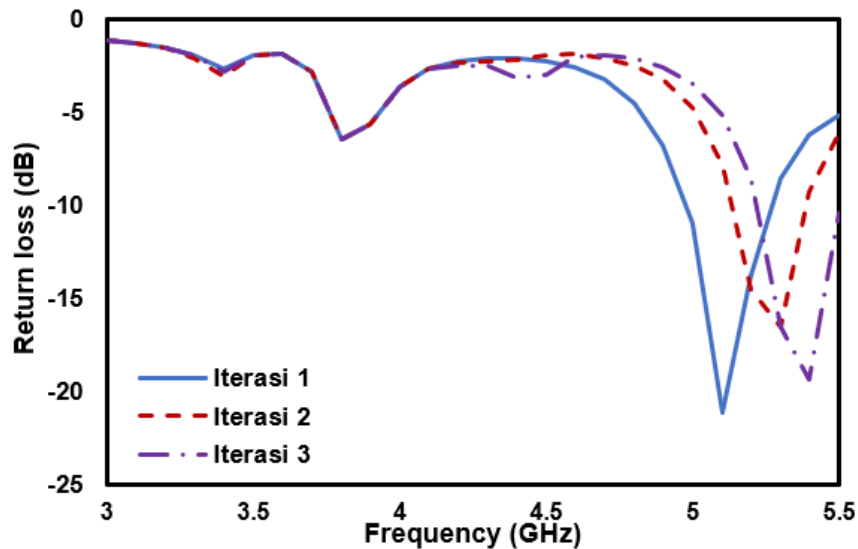
Paramater	K	i	G	M	j	c
Dimensi	15 mm	13 mm	19 mm	20 mm	6 mm	1.3 mm

Dimensi *Y slot* ditunjukkan dengan parameter c pada tabel 2 diperoleh setelah dilakukan iterasi dengan nilai 1 mm, 2 mm dan 3 mm.

Tabel 3. Iterasi Dimensi *Y Slot*

Iterasi ke-	Dimensi c
1	1 mm
2	2 mm
3	3 mm

Tabel 3 menunjukkan tahapan iterasi yang dilakukan agar dapat memperoleh dimensi *Y slot* untuk parameter c guna menghasilkan antena yang dapat bekerja pada frekuensi ganda. Antena disimulasikan menggunakan *Software AWR 2009*. Hasil simulasi dimensi *Y slot* dapat dilihat pada gambar 5.



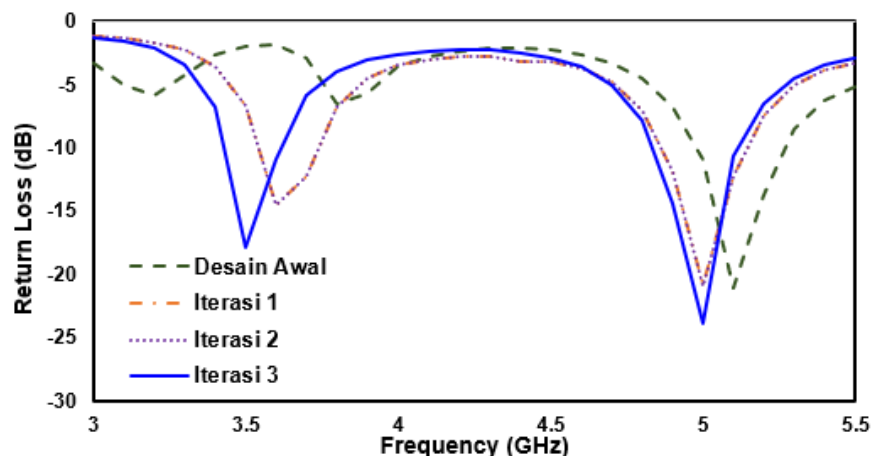
Gambar 5. Hasil Simulasi Nilai *Return Loss* Dimensi Y slot

Secara umum untuk mengontrol frekuensi kerja suatu antena dapat dilakukan dengan mereduksi dan memperbesar dimensi dari *patch*. Tahapan iterasi awal dilakukan dengan mengontrol nilai panjang *patch* (L). Iterasi terhadap dimensi L yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Iterasi Dimensi L

Iterasi ke-	Parameter (mm)	
	W	L
Desain awal	34	28
1	34	28,5
2	34	29
3	34	29,5

Antena disimulasikan menggunakan *Software AWR Design Environment 2009*. Pada Gambar 6 memperlihatkan pengaruh panjang *patch* (L) terhadap frekuensi antena.

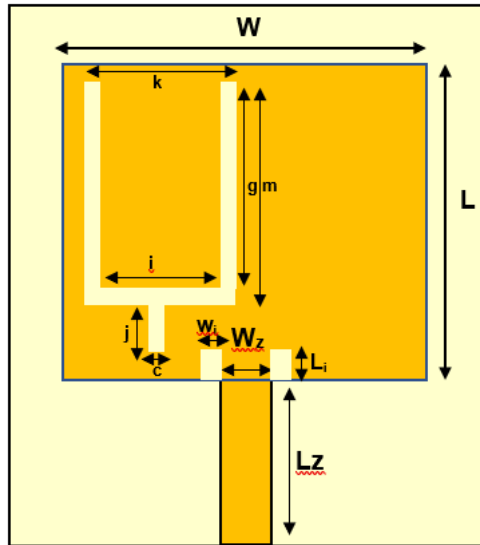


Gambar 6. Hasil Simulasi Nilai *Return Loss* pada Panjang *Patch* Antena Mikrostrip *Dual Band*

Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa dengan dilakukan iterasi pada panjang *patch* (L) mampu menghasilkan antena yang dapat bekerja pada frekuensi yang diinginkan yaitu frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz pada iterasi ke-3. Antena memiliki nilai *return loss* untuk frekuensi 3,5 GHz yaitu -17,79 dengan rentang frekuensi kerja (3,4 – 3,6 GHz) dan untuk frekuensi 5 GHz yaitu -23,5 dB dengan rentang frekuensi kerja (4,9 – 5,1 GHz) untuk nilai *return loss* \leq -10 dB.

Setelah diperoleh antena yang dapat bekerja pada frekuensi ganda (*dual band*) selanjutnya dilakukan tahap iterasi untuk mengoptimasi nilai dari *return loss* dengan cara menambahkan *inset feed*. Penambahan *inset feed* pada antena

mikrostrip *dual band* dengan menggunakan metode *Y slot* adalah untuk mempermudah optimasi *return loss*. Desain Antena mikrostrip dengan menggunakan metode *Y slot* dan ditambahkan *inset feed* dapat dilihat pada gambar 7.



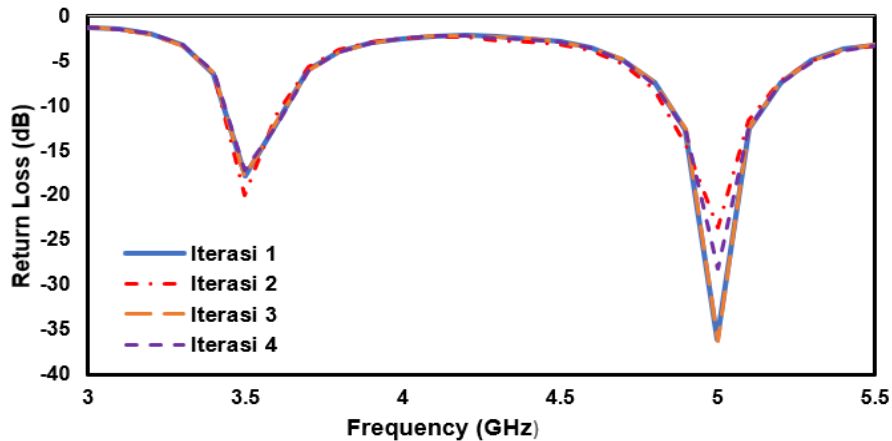
Gambar 7. Desain Antena Mikrostrip *Dual Band* dengan menggunakan *Y Slot* dan *Inset feed*

Untuk *inset feed* dilakukan dengan menambah celah pada *patch*. Lebar celah (W_i) mulai dari 0,7 mm, 1mm, 1,3mm dan 1,6 mm dengan panjang celah (L_i) 1,8 mm.

Tabel 5. Iterasi Panjang *Inset feed*

Iterasi ke-	Panjang (L_i)	Lebar (W_i)
1	1,8 mm	0,7 mm
2	1,8 mm	1 mm
3	1,8 mm	1,3 mm
4	1,8 mm	1,6 mm

Tabel 5 merupakan tabel iterasi dimensi *inset feed*. Parameter yang diubah adalah lebar celah (W_i). Hasil Simulasi Penambahan *inset feed* pada desain antena mikrostrip *dual band* dengan menggunakan *Y slot* dapat dilihat pada gambar 8.

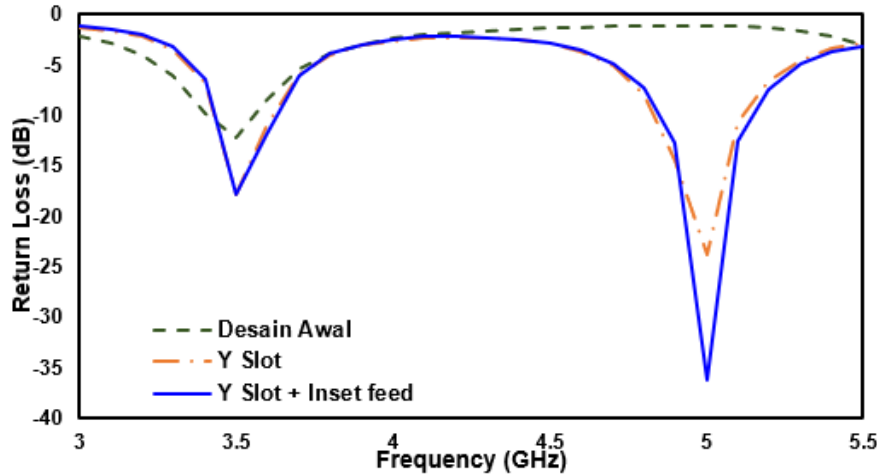


Gambar 8. Hasil Simulasi Nilai *Return Loss* Antena Mikrostrip *Dual Band* dengan Menggunakan *Y Slot* dan *Inset feed*

Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa penambahan *inset feed* yang dilakukan dapat meningkatkan nilai *return loss* dari antena yang disimulasikan. Penambahan *inset feed* ini paling berpengaruh pada nilai *return loss* frekuensi 5 GHz. Dapat dilihat bahwa nilai parameter yang paling baik yaitu saat panjang *inset feed* 1,8 mm dengan lebar *inset feed* 1,3 mm. Tetapi optimasi pada *return loss* yang dilakukan hanya mempengaruhi nilai parameter pada frekuensi 5 GHz, sedangkan pada frekuensi 3,5 GHz tidak berpengaruh. Nilai *return loss* untuk frekuensi 3,5 GHz sebelum di

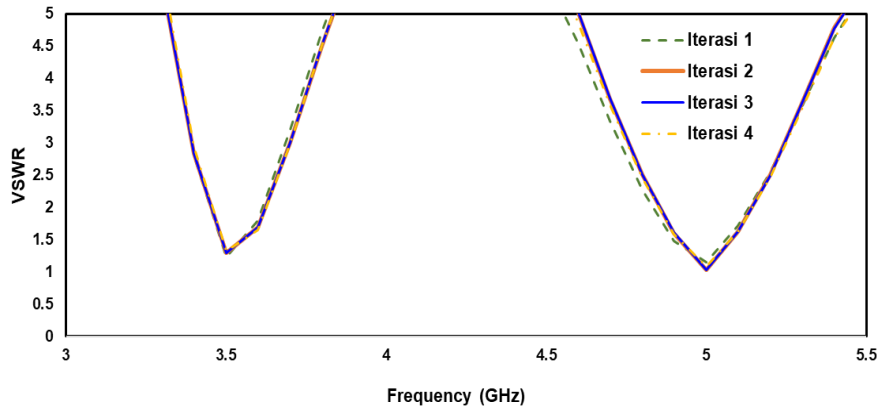
tambahkan *inset feed* adalah -17,79 dB dan setelah ditambahkan menjadi -17,86 dB sedangkan untuk frekuensi 5 GHz yang awalnya -23,5 dB menjadi -36,27 dB.

Untuk perbandingan hasil simulasi parameter antenna pada desain awal antenna, desain antenna dengan menggunakan metode Y slot dan desain antenna dengan menggunakan Y slot di tambahkan *inset feed* dapat dilihat pada gambar 9 untuk nilai *return loss*, Gambar 10 untuk nilai VSWR dan Gambar 11 untuk *gain* antenna.



Gambar 9. Perbandingan Hasil Nilai *Return loss*

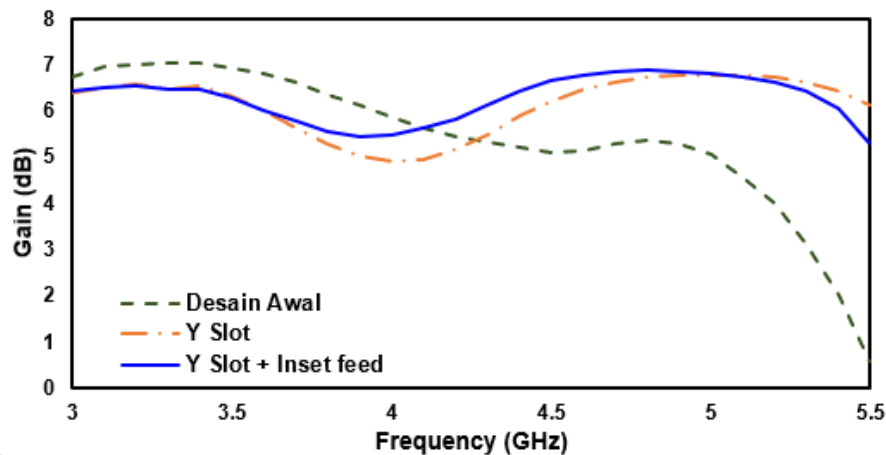
Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa metode Y slot mampu menghasilkan antenna dengan frekuensi ganda (*dual band*) sesuai dengan frekuensi yang di usulkan. Pada desain awal antenna hanya bekerja pada frekuensi 3,5 GHz saja, kemudian setelah ditambahkan metode Y slot mampu menghasilkan antenna yang dapat bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz. Dan penambahan *inset feed* dapat mengoptimasi nilai *return loss* untuk frekuensi 5 GHz dengan sangat baik, tetapi untuk frekuensi 3,5 GHz tidak terlalu berpengaruh.



Gambar 10. Perbandingan Hasil Nilai VSWR

Pada Gambar 10 merupakan hasil simulasi nilai VSWR ketiga model antenna. Nilai VSWR yang dihasilkan oleh desain awal antenna dengan frekuensi kerja 3,5 GHz adalah 1,644, yang kemudian setelah ditambahkan dengan metode Y Slot mampu mereduksi nilai VSWR pada frekuensi kerja 3,5 GHz menjadi 1,296 sedangkan untuk nilai VSWR frekuensi 5 GHz adalah 1,138. Selanjutnya dilakukan penambahan *inset feed* pada antenna yang juga mampu mereduksi nilai VSWR. Setelah ditambahkan *inset feed* nilai VSWR pada frekuensi 3,5 GHz menjadi 1,294 dan untuk frekuensi 5 GHz memiliki nilai VSWR 1,031. Nilai VSWR yang di peroleh sudah cukup baik, karena nilai tersebut mendekati nilai VSWR ideal yaitu 1.

Selanjutnya untuk nilai *gain* antenna dapat dilihat pada gambar 11. Untuk *gain* antenna pada desain antenna awal dengan frekuensi kerja 3,5 GHz diperoleh nilai 6,923 dB, setelah di tambahkan Y slot *gain* antenna menjadi 6,305 dB *Gain* antenna pada frekuensi 3,5 GHz. Saat frekuensi 5 GHz *gain* antenna adalah 6,786. Antena yang dihasilkan ditambahkan dengan *inset feed* sehingga diperoleh nilai *gain* untuk frekuensi 3,5 GHz yaitu 6,259 dB dan untuk frekuensi 5 GHz yaitu 6,813 dB. Penurunan nilai parameter *gain* antenna terjadi karena adanya reduksi dimensi.



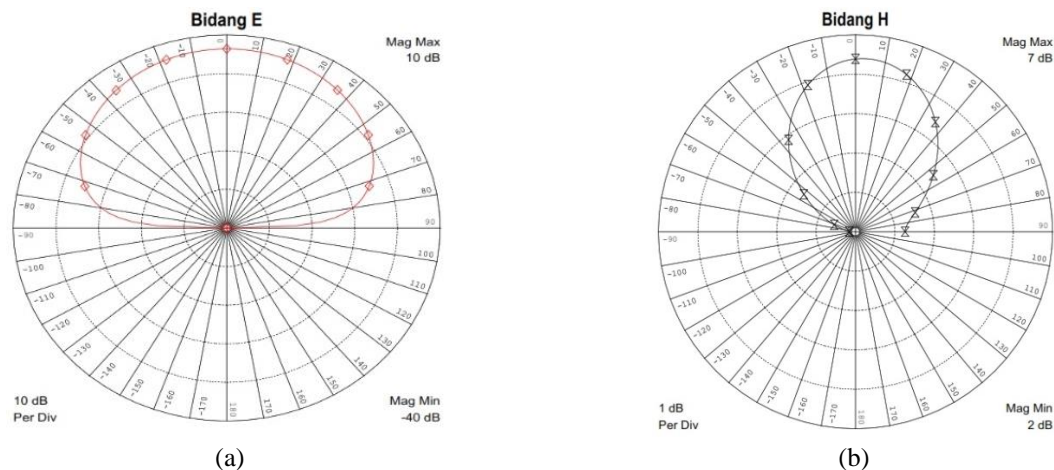
Gambar 11. Perbandingan Hasil Nilai Gain

Tabel 6. Perbandingan Hasil Simulasi Parameter Antena

Model	Frekuensi (GHz)	Parameter		
		Return loss (dB)	VSWR	Gain (dB)
Desain Awal	3,5	-12,26	1,644	6,923
	5	-1,133	15,63	5,068
Y slot	3,5	-17,79	1,296	6,305
	5	-23,5	1,138	6,786
Y slot dan inset feed	3,5	-17,86	1,294	6,259
	5	-36,27	1,031	6,813

Pada tabel 6 dapat dilihat bahwa desain awal frekuensi 3,5 GHz memiliki nilai *return loss* -12,26 dB sedangkan setelah ditambahkan dengan metode Y slot nilai *return loss* menjadi -17,79 dB. Peningkatan performansi nilai *return loss* dari penambahan Y slot untuk frekuensi 3,5 GHz adalah 45,11%. Selanjutnya dilakukan iterasi untuk optimasi nilai *return loss* dengan menambahkan *inset feed* pada antena. Tetapi optimasi pada *return loss* yang dilakukan hanya mempengaruhi nilai parameter pada frekuensi 5 GHz, sedangkan pada frekuensi 3,5 GHz tidak terlalu berpengaruh. Nilai *return loss* untuk frekuensi 3,5 GHz sebelum ditambahkan *inset feed* adalah -17,79 dB dan setelah ditambahkan menjadi -17,86 dB. Peningkatan performansi nilai *return loss* dari penambahan *inset feed* untuk frekuensi 3,5 GHz adalah 0,39%. Sedangkan untuk frekuensi 5 GHz yang awalnya -23,5 dB menjadi -36,27 dB. Peningkatan nilai *return loss* dari penambahan *inset feed* untuk frekuensi 5 GHz adalah 54,34%. Untuk *gain* antena pada desain antena awal dengan frekuensi kerja 3,5 GHz diperoleh nilai 6,923 dB, setelah di tambahkan Y slot *gain* antena menjadi 6,305 dB seperti yang dapat dilihat pada tabel 6. *Gain* antena pada frekuensi 3,5 GHz mengalami penurunan sebesar 8,93%. Saat frekuensi 5 GHz *gain* antena adalah 6,786. Antena yang dihasilkan ditambahkan dengan *inset feed* sehingga di peroleh nilai *gain* untuk frekuensi 3,5 GHz yaitu 6,259 dB dan untuk frekuensi 5 GHz yaitu 6,813 dB.

Untuk hasil simulasi pola radiasi antena dapat dilihat pada gambar 12 disimulasikan menggunakan *Software AWR Design Environment 2009*.



Gambar 12. Pola Radiasi Antena Antena dengan Metode Y Slot dan Inset Feed ; (a) Bidang E , Bidang H

Perbandingan hasil simulasi pola radiasi antena dapat di lihat pada gambar 11. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa antena memiliki pola radiasi dengan sudut pancar yang lebar (*broadside*).

Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dirancang antena mikrostrip frekuensi ganda (*dual band*) dengan menggunakan metode Y slot untuk sistem komunikasi 5G dan Wi-Fi yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz. Nilai *return loss* yang dihasilkan dengan menggunakan metode Y slot untuk frekuensi 3,5 GHz adalah -17,79 dB dan untuk frekuensi 5 GHz memiliki nilai *return loss* -23,5 dB. Peningkatan performansi desain awal antena dengan ditambahkan metode Y slot yaitu nilai *return loss* 45,11%. Untuk nilai VSWR saat frekuensi 3,5 GHz yaitu 1,296 dan untuk frekuensi 5 GHz adalah 1,138 mengalami peningkatan performa sebesar 21,17%, Sedangkan gain antena memiliki nilai yaitu 6,305 dan 6,786 untuk frekuensi 3,5 GHz dan 5 GHz mengalami penurunan sebesar 8,93%. Penambahan *inset feed* berhasil mengoptimasi *return loss* meskipun hanya mampu mengoptimasi *return loss* pada frekuensi 5 GHz, sedangkan pada frekuensi 3,5 GHz tidak terlalu signifikan. Peningkatan performansi metode Y Slot setelah di tambahkan *inset feed* yaitu untuk nilai *return loss* saat frekuensi 3,5 GHz 0,39 % dan frekuensi 5 GHz 54,34% sedangkan untuk nilai VSWR pada frekuensi 3,5 GHz sebesar 0,16 % dan frekuensi 5 GHz 9,4 %.

Daftar Notasi

- W = Lebar *patch* antena mikrostrip
- L = Panjang *patch* antena mikrostrip
- ϵ_r = konstanta dielektrik
- Wz = Lebar saluran pencatu
- B = Konstanta impedansi
- h = Ketebalan Substrat
- Li = Panjang *inset feed*
- Wi = Lebar *inset feed*
- C = Kecepatan rambat cahaya
- F = Frekuensi
- L_{eff} = Panjang *patch* efektif
- ΔL = Panjang tambahan *patch*
- ϵ_{reff} = Konstanta dielektrik efektif

Daftar Pustaka

- Alam, S., & I.G.N.Y, W. (2017). *Pengantar antena dan propagasi konsep dasar dan teori*.
- Alam, S., Rizka, N. M., Surjati, I., Marlina, P. D., Tjahjadi, G., Elektro, J. T., Industri, F. T., Trisakti, U., Studi, P., Telekomunikasi, T., & Jakarta, A. T. (2020). *Desain Antena Mikrostrip dengan Multi Band Frekuensi Menggunakan Metode Parasitik*. 19. <https://doi.org/10.26874/jt.vol19no01.138>
- Azmi, A. (2015). *IEEE 802 . 11ac sebagai Standar Pertama untuk Gigabit Wireless LAN*. May. <https://doi.org/10.17529/jre.v11i1.1994>
- Darmawan, P. A., Nur, L. O., Wijanto, H., Elektro, F. T., Telkom, U., & Akses, T. (2018). *ANTENA MIKROSTRIP ARRAY 1 × 4 INSET-FED PATCH PERSEGI untuk WIFI 2 , 4 GHz ACCESS POINT*. 5(1).
- Hanafiah, A., Suherman, & Abdillah, K. (2016). *Perancangan Antena Mikrostrip Patch Segi Empat Dual Band (1 , 8 GHz dan 2 , 4 GHz)*. October.

- Hikmaturokhman, A., Ramli, K., & Suryanegara, M. (2018). *Spectrum Considerations for 5G in Indonesia*. <https://doi.org/10.1109/ICICTR.2018.8706874>
- Hongwei, W., & Guangli, Y. (2018). Design of 4×4 microstrip quasi-yagi beam-steering antenna array operation at 3.5ghz for future 5g vehicle applications. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 7(6), 34–37.
- PARAGYA, D., & SISWONO, H. (2020). 3.5 GHz Rectangular Patch Microstrip Antenna with Defected Ground Structure for 5G. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i1.31>
- Rhee, S.-Y. (2016). *Dual Band Microstrip Antenna with Modified Inset feed er and a Slot*. 27. <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2016.27.9.800>
- Sumpena, M. R., Madiawati, H., & Elisma. (2020). Desain Antena Susun Mikrostrip Rectangular Patch 4x2 Untuk Aplikasi 5G. *Prosiding The 11th Industrial Research Workshop and National Seminar*.
- Wali, R., Ghnimi, S., Hand, A. G., & Razban, T. (2014). Analysis and design of a new dual band microstrip patch antenna based on slot matching Y-shaped. *Journal of Engineering Research*, 11. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol11iss2pp89-97>

Analisis Pengaruh Variasi Diameter *Driven Pulley* terhadap *Output* Kecepatan Putar dan Torsi Akhir pada Trainer Transmisi *Toyota Kijang Innova E 2.0 M/T*

Febri Panji Diharja¹, Mochammad Arif Irfa'i¹, dan Mohammad Munib Rosadi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasyim Asy'ari, Jombang, Indonesia

febripanji.diharja98@gmail.com, arifirfai@unesa.ac.id, munib.rosadi@gmail.com

Abstrak

Pulley merupakan alat penerima dan pengubah tenaga putar dan momen gaya yang berhubung satu sama lain menggunakan *v-belt*, sedangkan transmisi merupakan mekanisme pengkonversi tenaga dari tenaga *input* menghasilkan tenaga *output* yang bervariasi. Torsi (momen gaya) dan kecepatan putar dipengaruhi oleh perbandingan gigi atau ukuran *pulley*. Ukuran *pulley* pada poros *input* juga sangat mempengaruhi torsi dan RPM. Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan sebuah uji coba ukuran *driven pulley*. Maka dilakukannya penelitian ini untuk mengamati pengaruh ukuran *driven pulley* terhadap *output* kecepatan putar dan torsi akhir dari ukuran *driven pulley* yang digunakan. Penelitian ini memakai 3 macam ukuran *driven pulley*. *Driven pulley* 1 (150 mm), torsi tertinggi diperoleh 1013,23 Nm dan *output* kecepatan putar tertinggi sebesar 1339,5 rpm. Pada *driven pulley* 2 (200 mm), torsi tertinggi diperoleh 1350,97 Nm dan *output* kecepatan putar tertinggi sebesar 1004,62 rpm. Sedangkan *driven pulley* 3 (250 mm), torsi tertinggi diperoleh 1688,74 Nm dan *output* kecepatan putar tertinggi sebesar 803,7 rpm. Pada hasil uji ANOVA tidak terdapat perbedaan signifikan antara ketiga jenis variasi diameter *pulley*, ditunjukkan nilai Sig. 0,395 untuk *output* kecepatan putar dan Sig. 0,491 untuk torsi akhir.

Kata kunci: Torsi Akhir, *Output* Kecepatan Putar, Ukuran *Driven Pulley*.

Abstract

Pulley is a receiver and converter of rotary power and moment of force associated with each other using a *v-belt*, while the transmission is a mechanism to convert power from input power to produce variable output power. Torque (moment of force) and rotational speed are affected by gear ratio or pulley size. The size of the pulley on the input shaft also greatly influences torque and RPM. Where necessary to do a trial-driven pulley size. Therefore, this research was conducted to determine the effect of the driven pulley size on the output rotational speed and final torque of the driven pulley size used. This research uses 3 kinds of driven pulley sizes. Driven pulley 1 (150 mm), the highest torque is 1013.23 Nm and the highest output rotational speed is 1339.5 rpm. In driven pulley 2 (200 mm), the highest torque is 1350.97 Nm and the highest rotational speed output is 1004.62 rpm. While driving pulley 3 (250 mm), the highest torque is obtained 1688.74 Nm, and the highest output rotational speed of 803.7 rpm. In the ANOVA test results, there were no significant differences between the three types of pulley diameter variation, indicated by the Sig. 0,395 for output rotational speed and Sig. 0.491 for final torque.

Keywords: Final Torque, Output Rotational Speed, Driven Pulley Size.

1. Pendahuluan

Semakin berkembangnya kemajuan teknologi dari tahun ke tahun, dengan tidak sadar kita akan mengikuti perkembangannya. Terutama bidang kendaraan transportasi, yang sangat penting dibutuhkan oleh masyarakat luas. Maka sebab itu, alat transportasi berupa kendaraan sangat diperlukan apalagi untuk melakukan kegiatan sehari-hari. Dalam sebuah kendaraan pastinya terdapat mekanisme penunjang sebagai pendukung kinerja kendaraan (Aminullah dkk., 2017). Mekanisme tersebut adalah transmisi, merupakan mekanisme pengkonversi tenaga dari sumber tenaga yang menghasilkan bervariasi tenaga yang diperlukan. Tenaga tersebut berupa kecepatan akhir dan torsi. Hasil konversi yang mengubah kecepatan putar tinggi menjadi putaran rendah tetapi menghasilkan tenaga yang lebih kuat, atau sebaliknya. Sedangkan torsi yang dihasilkan oleh transmisi, dibutuhkan kendaraan terutama pada saat mulai bergerak yang membutuhkan torsi yang tinggi. Selain itu, torsi tinggi sangat dibutuhkan kendaraan saat berjalan pada medan yang menanjak naik, jalan datar dan menurun. Penggunaan transmisi tidak hanya kita temukan di dunia otomotif atau kendaraan, melainkan di dunia perindustrian banyak menerapkan sistem transmisi sebagai pengkonversi tenaga. Dalam industri yang umum digunakan *gear box*, rantai, atau *v-belt*.

Transmisi kendaraan sangat penting diperlukan karena mesin kendaraan umumnya menggunakan sistem pembakaran dalam yang menghasilkan putaran antara 600-6000 rpm. Sedangkan untuk roda kendaraan yang digerakkan umumnya berputar pada kecepatan putar antara 0-2500 rpm (Editorial, 2019). Indonesia sendiri, umumnya ada beberapa macam tipe transmisi (*gear box*) yang dipakai, antara lain transmisi tipe

Info Makalah:

Dikirim : 10-11-2021;
Revisi 1 : 01-04-2022;
Revisi 2 : 03-14-2022;
Revisi 3 : 04-18-2022;
Diterima : 04-18-2022.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-895-3424-62938
e-mail : febripanji.diharja98@gmail.com

pemindah gigi dengan cara manual dan tipe pemindah sudah otomatis atau semi otomatis. Selain itu jenis dari transmisi juga terdapat beberapa tipe, antara lain roda gigi yang dihubungkan dengan rantai antara satu roda gigi dengan roda gigi lain, yang kedua menggunakan *v-belt* sebagai pengganti rantai, dan yang terakhir dengan *gear box* dengan roda gigi akan saling berhubungan langsung, tanpa adanya konektor tambahan seperti rantai atau *v-belt*. Berdasarkan dari tiga jenis tersebut *v-belt* merupakan yang paling familiar digunakan, karena dari perawatan yang mudah dan tidak menimbulkan suara bising. Teknik prosedur transmisi manual merupakan sistem pengkonversi tenaga mesin dengan pengoperasian secara manual, menggunakan tuas untuk menggeser gigi-gigi didalam transmisi untuk memilih tenaga yang diperlukan sesuai kondisi kemampuan mesin. Sedangkan tipe pemindah otomatis, ialah sistem transmisi dengan pengoperasian pemindah gigi tidak manual lagi, melainkan secara semi otomatis atau otomatis penuh bersumber pada putaran mesin (besar kecil penekan pedal gas), kekencangan laju kendaraan, dan tanpa memerlukan dukungan tuas kopling (Susanto dkk., 2017). Mekanisme transmisi di kendaraan telah dirancang khusus guna mendapatkan hasil momen gaya yang terlampaui besar ketika suatu kendaraan mulai bergerak, jalanan naik atau mengangkat beban berat dan melangsungkan akselerasi.

Momen gaya (torsi) yang didapatkan dari mesin cenderung tetap (stabil), namun sesudah dihubungkan pada sistem transmisi, torsi akan divariasikan. Variasi torsi dilakukan dengan mereduksi kecepatan putar, melalui komparasi jumlah masing-masing gigi transmisi. Untuk memperoleh kecepatan putar tinggi harus menurunkan momen gaya, sedangkan untuk mendapatkan momen gaya yang tinggi harus menurunkan kecepatan putar (Wakid, 2011). Torsi standarnya diperoleh dari multiplikasi gaya tangensial (F_t) dengan jarak yang tegak lurus terhadap arah gaya untuk mendapatkan suatu putaran (Irawan, 2016).

Berlandaskan konsep bidang elemen mesin, dipaparkan bahwa perencanaan struktur transmisi harus faham berapa nilai komparasi jumlah setiap gigi yang dipakai untuk mendapatkan varian nilai torsi yang diharapkan. Berdasarkan dari konsep tersebut, juga mendalami perhitungan rumus rpm, momen gaya dan komparasi gigi dari putaran mesin sesudah di konversi oleh susunan gigi transmisi. Kebanyakan untuk mengetahui rpm, momen gaya dan komparasi gigi beraskan dari tenaga mesin kendaraan. Pada peluang ini, peneliti ingin mengerjakan sebuah riset dengan mengganti sumber tenaga menggunakan motor listrik AC dengan modifikasi diameter *driven pulley* pada poros masuk sebuah trainer peraga transmisi sebagai trainer pembantu untuk mengetahui seberapa besar pengaruh yang dihasilkan dari perubahan diameter *driven pulley* terhadap trainer transmisi.

Handoyo, *et al.* (2019) telah meriset bahwa ukuran *pulley* dapat mempengaruhi putaran yang dihasilkan. Jika *pulley* memiliki ukuran diameter yang besar, maka akan menghasilkan putaran rpm yang pelan, sebaliknya bila ukuran diameter lebih kecil akan menghasilkan putaran rpm yang cepat. Berdasarkan dari data riset, Munandar, *et al.* (2019) telah melakukan eksperimental terhadap variasi diameter *pulley*, dengan ukuran *pulley* 6, 9, dan 13 inci. Hasil tersebut diperoleh rpm dari ketiga *pulley*. Besaran rpm kecil hanya didapatkan pada ukuran diameter *pulley* yang berukuran besar, sedangkan *pulley* berdiameter kecil mampu menghasilkan putaran rpm yang besar. Pambudi, *et al.* (2019) telah membuktikan peran rasio juga mempengaruhi rpm akhir dan torsi, baik itu rasio *pulley* atau roda gigi. Didapatkan data dari riset tersebut, ukuran nilai rasio mempengaruhi nilai torsi akhir dengan nilai rasio gigi awal 3,85 menghasilkan torsi 207,3 Nm dan nilai rasio gigi akhir (*output*) didapatkan 11,52 dengan nilai torsi 600 Nm.

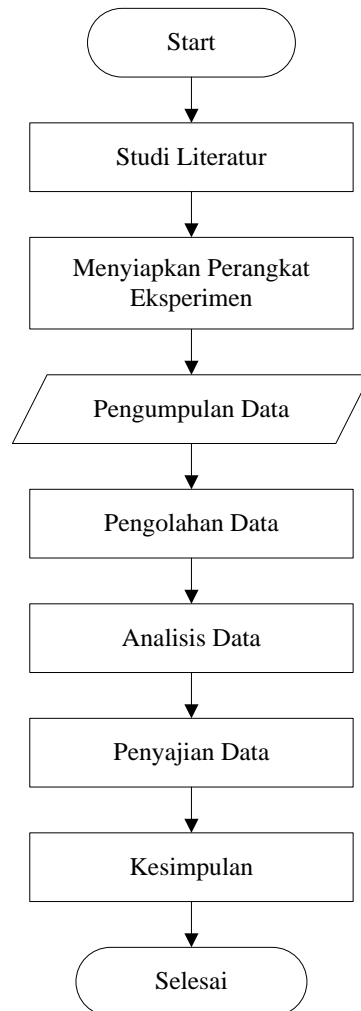
Penelitian ini dilakukan karena ingin memperoleh hasil dari efek variasi diameter *driven pulley* yang dipasangkan pada poros masuk trainer transmisi terhadap hasil nilai kecepatan putar akhir, torsi akhir dan juga melihat apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara ketiga ukuran diameter *driven pulley* tersebut. Fungsi dari trainer transmisi ini untuk mendapatkan varian hasil nilai data yang dihasilkan dari setiap *driven pulley*. Pada penelitian ini, akan menggunakan variasi ukuran diameter *driven pulley* 150, 200 dan 250, dengan satuan ukuran mili meter yang akan dipasang pada poros masuk alat peraga trainer transmisi mobil, dengan sumber tenaga putarnya didapatkan dari motor listrik AC. Alasan penelitian menggunakan *pulley* dan *v-belt* dibandingkan *gear* dan rantai yakni dari segi perawatan akan lebih mudah menggunakan *pulley* dan *v-belt* dan suara yang dihasilkan juga lebih halus atau tidak berisik.

2. Metode dan Bahan

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kuantitatif, merupakan suatu metode riset yang memperoleh hasil data riset berupa nilai numerik yang diperoleh berdasarkan konsep dalam ilmu iptek dan serta menganalisisnya memakai statistika (Sugiyono, 2015). Sesudah mendapatkan data berupa nilai numerik, dilanjutkan menganalisis dan pengolahan menjadi suatu penjelasan dari himpunan data-data valid dan rasional untuk hasil sebuah riset (Martono, 2016). Proses penelitian atau riset berikut menggunakan metode eksperimental yang melakukan pengujian terhadap beberapa perbedaan diameter *driven pulley* pada hasil kecepatan putar akhir dan nilai torsi akhir terhadap mekanisme transmisi mobil yang dipakai.

Variabel bebas dari penelitian ini, diameter *driven pulley* yang berukuran 150, 200, dan 250 dengan satuan mili meter. Pada variabel terikatnya yaitu rpm akhir (kecepatan putar) dan hasil akhir dari perhitungan torsi, karena rpm akhir (kecepatan putar) dan torsi akhir, dipengaruhi oleh ukuran *driven pulley*. Sedangkan variabel terkontrol tidak lain satu unit trainer mekanisme transmisi milik *toyota kijang innova tipe E 2.0 MT* dan motor listrik AC yang memakai ukuran *pulley* penggerak 60 mm. Pada penelitian ini menggunakan *pulley* diameter 60 mm yang merupakan standar bawaan dari motor listrik AC yang digunakan dan juga berguna untuk mendapatkan torsi putar yang besar

untuk memutar poros masuk transmisi. Karena dalam kinerja transmisi mobil tenaga untuk memutarinya diperoleh dari proses konversi energi dalam mesin bakar yang mampu menghasilkan tenaga torsi yang besar, sehingga dalam penelitian ini tetap menggunakan *pulley* standar motor listrik AC 60 mm agar mendapatkan torsi yang cukup kuat memutar sebuah trainer transmisi mobil untuk membantu mendapatkan hasil nilai perbandingan dari ketiga variasi ukuran diameter *driven pulley*. Penggunaan *driven pulley* 150, 200, dan 250 mm merupakan ukuran *pulley* yang sering atau umum digunakan dalam sebuah mekanisme pada alat penggerak. Adapun skema alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Tahapan Penelitian.

Pada Gambar 1 menjelaskan dengan singkat, hasil dari perhitungan data akan diolah untuk memperoleh sebuah data yang pasti (valid). Diawali dengan studi literatur, sebuah tahapan proses mengkaji dari berbagai sumber yang memiliki keterkaitan dengan judul penelitian tersebut. Setelah itu dilanjutkan dengan mempersiapkan perangkat eksperimen seperti objek penelitian, instrumen pengukur, dan alat penunjang lainnya. Pengumpulan data disini tahapan mencari data yang digunakan berupa wawasan narasi seputar media yang dianalisis dan perhitungan untuk mencari rpm, perbandingan roda gigi (*gear ratio*) pada trainer transmisi, dan torsi awal untuk memutar *driven pulley*. Setelah data sudah terkumpul, dilanjutkan menghitung atau mencari kecepatan putar akhir dan torsi akhir dari ketiga varian *driven pulley*, jika terdapat data yang belum valid, maka akan kembali mengulangnya. Pengolahan data merupakan proses data-data akan diolah kembali dari hasil perhitungan. Pengolahan data tersebut digunakan untuk memverifikasi apabila terdapat kekurangan atau kesalahan dari tahapan sebelumnya dalam mendapatkan data (Narbuko dkk., 2013). Setelah itu dilakukannya proses analisis data, tahapan ini melakukan pengecekan ulang dan mengevaluasi kembali hasil perhitungan apakah terdapat kesalahan atau tidak, jika data sudah benar dinyatakan valid maka data akan disajikan kedalam bentuk tabel maupun bentuk grafik agar mempermudah mencari kesimpulan dari penelitian tersebut. Jika semua sudah, tinggal menarik kesimpulan dari hasil penelitian tersebut secara singkat dan jelas.

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan alat-alat untuk proses eksperimental antara lain 1 unit mekanisme *gear box* (transmisi) milik mobil *Toyota kijang innova* tipe *E 2.0 M/T*, neraca pegas gantung 10 Newton, motor listrik AC, *v-belt*, sedangkan bahannya variasi ukuran diameter *driven pulley* dari 150, 200, dan 250 satuan mili meter.

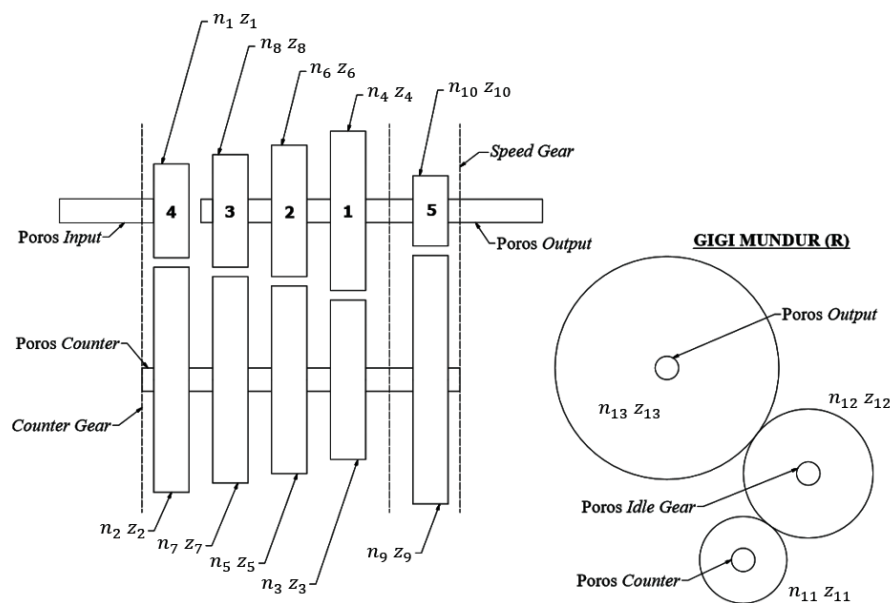


Gambar 2. Roda Puli yang Digunakan



Gambar 3. Transmisi milik Toyota Kijang Innova Tipe E 2.0 M/T yang Digunakan.

Transmisi yang digunakan adalah milik kendaraan mobil *Toyota*, dengan merk *kijang innova* tipe E tahun 2008 generasi ke 3 dengan jenis transmisi manual. Berdasarkan referensi, kendaraan itu terbilang mengusung mesin berkapasitas silinder 1998 cc, tenaga maksimalnya didapat sebesar 136 PS terhadap putaran 5600 rpm dan nilai torsi maksimal yang dihasilkan sekitar 18,6 Kg.m terhadap putaran 4000 rpm. Jenis kendaraan tersebut mempunyai pengoperasian tipe transmisi penggerak manual dengan didukung 5 gigi percepatan dan 1 gigi mundur (Febrian, 2019).



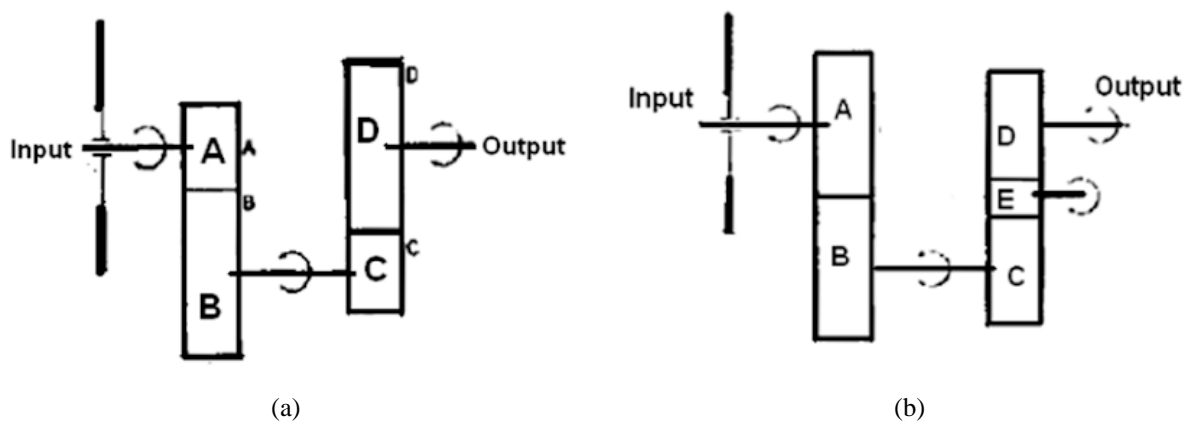
Gambar 4. Struktur Penataan Gigi-Gigi di dalam Transmisi Milik *Toyota Kijang Innova* Tipe *E 2.0 M/T*.

Skema pada Gambar 4 merupakan gambaran konstruksi susunan roda gigi yang ada didalam transmisi. Transmisi terdapat 5 gigi percepatan (*speed gear*) dengan satu roda gigi mundur. Spesifikasi dari motor dapat melihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Spesifikasi Motor Listrik AC sebagai Sumber Tenaga Putar.

Motor listrik tersebut adalah motor listrik 1 fasa dengan memerlukan daya 250 Watt, untuk kecepatan putar yang dihasilkan dari motor listrik sebesar 2850 rpm, dengan menggunakan *pulley* berdiameter 60 mm.



Gambar 6. (a) Perbandingan Rasio 4 Roda Gigi. (b) Perbandingan Rasio 5 Roda Gigi atau Gigi Mundur.

2.2 Perhitungan Nilai *Gear Ratio*, Torsi Rencana, *Output* Kecepatan Putar dan Torsi Akhir

Untuk mengetahui berapa nilai rasio dari transmisi maka harus menggunakan rumus perbandingan dari 4 roda gigi dan rumus perbandingan 5 gigi (gigi mundur). Nilai rasio (GR_x) tersebut dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (Wakid, 2011). Pada persamaan tersebut x adalah posisi gigi transmisi.

$$GR_x = \frac{z_B}{z_A} \times \frac{z_D}{z_C} \quad (1)$$

Jumlah roda gigi ada 5 untuk gigi mundur, maka menggunakan rumus Persamaan 2.

$$GR_x = \frac{z_B}{z_A} \times \frac{z_E}{z_C} \times \frac{z_D}{z_E} \quad (2)$$

Perhitungan torsi rencana (T_r) dicari agar mengetahui nilai torsi yang dibutuhkan motor listrik AC untuk memutar *driven pulley* terhadap setiap gigi transmisi. Perhitungan torsi rencana dapat menggunakan rumus Persamaan 3 (Sularso dkk., 2013).

$$T_r = F \cdot r \quad (3)$$

Menentukan kecepatan putar atau rpm akhir pada transmisi menggunakan perbandingan dari nilai z setiap gigi yang diketahui ketetapan rpm sumber penggerak motor listrik (n_d) adalah 2850 rpm, dengan menggunakan ukuran diameter *pulley* penggerak (d_d) adalah 60 mm. Rumus yang digunakan adalah rumus Persamaan 4 (Pambudi dkk., 2019).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} \quad (4)$$

Menentukan putaran akhir dari transmisi yang dihasilkan dari variasi *driven pulley* dengan membandingkan nilai rpm (n) dengan diameter *pulley* (d) pada motor terhadap variasi ukuran *driven pulley* yang sedang digunakan (d_x). Jika sudah diketahui rpm yang dihasilkan d_x maka dapat dihitung antara gigi-gigi yang bersinggungan, menggunakan rumus yang sama Persamaan 4. Sedangkan perhitungan torsi akhir dapat menggunakan rumus Persamaan 5 (Rosadi dkk., 2019).

$$T_A = 9,74 \times 10^5 \frac{P_d}{n_x} \quad (5)$$

Pada rumus Persamaan 5, P_d merupakan daya yang direncanakan dari motor listrik sebesar 250 Watt atau 0,25 kW, sedangkan n_x adalah nilai kecepatan akhir yang dihasilkan oleh varian *driven pulley* terhadap setiap gigi-gigi transmisi.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan berisi data hasil perhitungan berdasarkan teori dan metode yang digunakan, selain itu juga berisi hasil dampak ukuran dari roda puli yang digerakkan (*driven pulley*) pada hasil rpm akhir (kecepatan putar) dan torsi akhir serta penjelasan berdasarkan uji ANOVA.

3.1 Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan berisi data-data yang disajikan dalam bentuk tabel-tabel sedemikian rupa, sehingga mempermudah pembaca untuk melakukan referensi rujukan terkait penelitian ini. Isi tabel-tabel berikut tidak lain mencantumkan jumlah gigi (nilai z_x) setiap gigi-gigi yang ada dalam transmisi, nilai perbandingan roda gigi, torsi rencana, rpm akhir (kecepatan putar) dan torsi akhir.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Jumlah Gigi (Nilai z) Transmisi Milik Toyota Kijang Innova Tipe E 2.0 M/T.

Nilai Jumlah Setiap Gigi Transmisi (z)					
Z_1	=	27	Z_6	=	27
Z_2	=	45	Z_7	=	31
Z_3	=	14	Z_8	=	26
Z_4	=	33	Z_9	=	47
Z_5	=	21	Z_{10}	=	24
			Z_{11}	=	13
			Z_{12}	=	29
			Z_{13}	=	37

Jumlah nilai gigi yang ditunjukkan pada Tabel 1 diperoleh dari menghitung dari setiap gigi-gigi yang ada didalam transmisi, yang memiliki peran penting dalam kinerja mengkonversi tenaga. Setelah diketahui nilai z_x dari setiap gigi-gigi transmisi, dilanjutkan menghitung nilai perbandingan roda gigi (*gear ratio*).

Tabel 2. Nilai Perbandingan Roda Gigi Transmisi Milik Toyota Kijang Innova Tipe E 2.0 M/T.

Nilai Perbandingan Roda Gigi Transmisi						
Posisi Gigi	1	2	3	4	5	R
Nilai Rasio	3,93	2,14	1,4	1	0,85	4,74

Pada Tabel 2 nilai rasio tertinggi dihasilkan dari perbandingan pada gigi R (mundur), gigi 1, gigi 2, gigi 3, gigi 4, dan gigi 5.

Tabel 3. Hasil Nilai Torsi Rencana dari Ketiga Ukuran *Driven Pulley* terhadap Transmisi.

Torsi Rencana (Nm)			
Posisi Gigi	<i>Driven Pulley</i>		
	1	2	3
1	839,13	1118,82	1398,62
2	457,7	610,27	762,84
3	298,57	398,1	497,62
4	213,6	284,8	356
5	181,78	242,38	302,97
R	1013,23	1350,97	1688,74

Torsi rencana (T_r) yang dirangkum dalam Tabel 3 dicari untuk membandingkan dengan hasil torsi akhir, sehingga dapat diketahui jika ketahu hasil data torsi akhir lebih besar ($>$) dibandingkan torsi awal (rencana) berarti spesifikasi alat layak untuk beroperasi. Semakin besar margin maka akan semakin baik, berarti alat akan lebih mampu memutar beban. Margin didapatkan dari selisih antara torsi akhir dan torsi awal.

Tabel 4. Hasil Nilai Kecepatan Putar Akhir dari Ketiga Ukuran *Driven Pulley* terhadap Transmisi.

Driven Pulley	Hasil Kecepatan Putar Akhir (rpm)					
	Posisi Gigi					
	1	2	3	4	5	R
1	290,18	532	815,54	1140	1339,5	240,32
2	217,64	399	611,65	855	1004,62	180,24
3	174,1	319,2	489,32	684	803,7	144,19

Dalam menentukan nilai yang ditunjukkan pada Tabel 4 dapat menggunakan rumus Persamaan 4, pertama mencari putaran rpm *driven pulley* (n_{D1} , n_{D2} , ataupun n_{D3}) dengan membandingkan dengan rpm dari motor penggerak (n_d) adalah 2850 rpm. Setelah diketahui rpm *driven pulley*, maka dilanjut mencari nilai rpm poros *counter gear* yang diputar gigi 4. Jika sudah didapat nilai rpm poros *counter gear*, maka sudah bisa mencari nilai setiap gigi dari transmisi. Diketahui rpm dari *driven pulley* = rpm gigi 4 (n_1), sedangkan rpm poros *counter gear* sama semua ($n_2 = n_3 = n_5 = n_7 = n_9 = n_{11}$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil nilai dari kecepatan putar akhir, akan dipakai untuk mencari nilai torsi akhir dengan menggunakan rumus pada persamaan 5.

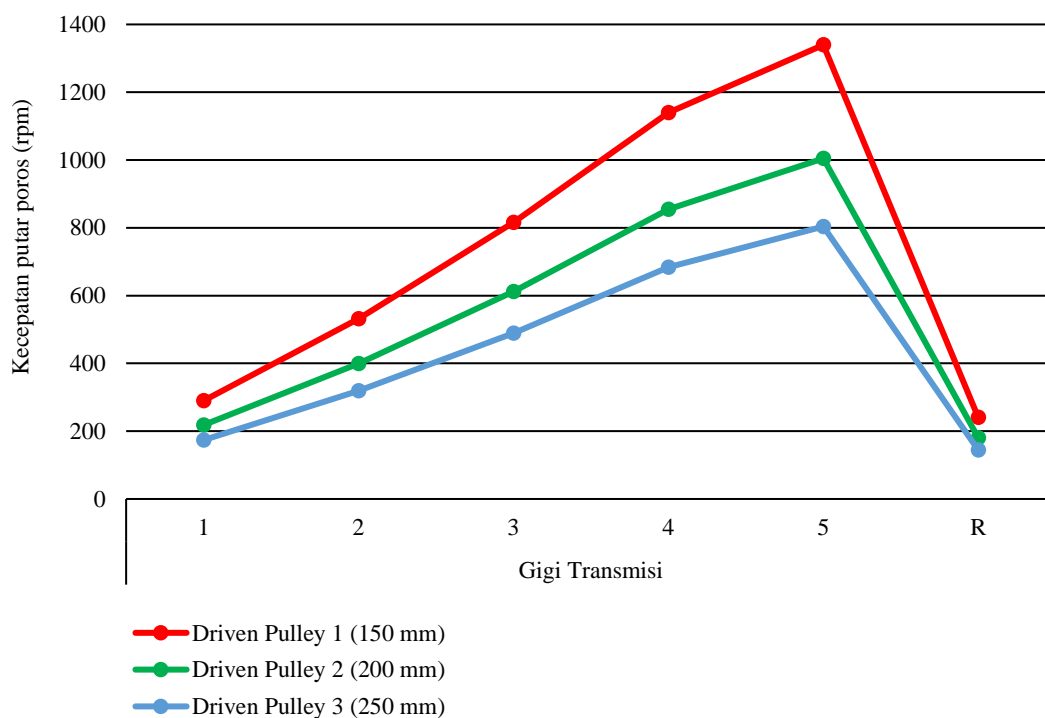
Tabel 5. Hasil Nilai Torsi Akhir dari Ketiga Ukuran *Driven Pulley* terhadap Transmisi.

Driven Pulley	Hasil Torsi Akhir (Nm)					
	Posisi Gigi					
	1	2	3	4	5	R
1	839,13	457,7	298,57	213,6	181,78	1013,23
2	1118,82	610,27	398,1	284,8	242,38	1350,97
3	1398,62	762,84	497,62	356	302,97	1688,74

Hasil yang ditunjukkan pada Tabel 5, merupakan hasil dari nilai torsi akhir yang dihasilkan setiap posisi gigi yang dimiliki oleh transmisi terhadap variasi tiga ukuran *driven pulley*.

3.2 Akibat Ukuran *Driven Pulley* pada Output RPM (Kecepatan Putar)

Berdasarkan hasil percobaan, untuk menentukan akibat ukuran dari roda puli yang digerakkan (*driven pulley*) pada rpm akhir yang dihasilkan, seperti diperlihatkan pada diagram perbandingan dari ketiga variasi ukuran *pulley* seperti pada yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Perbandingan Hasil Nilai Output Kecepatan Putar.

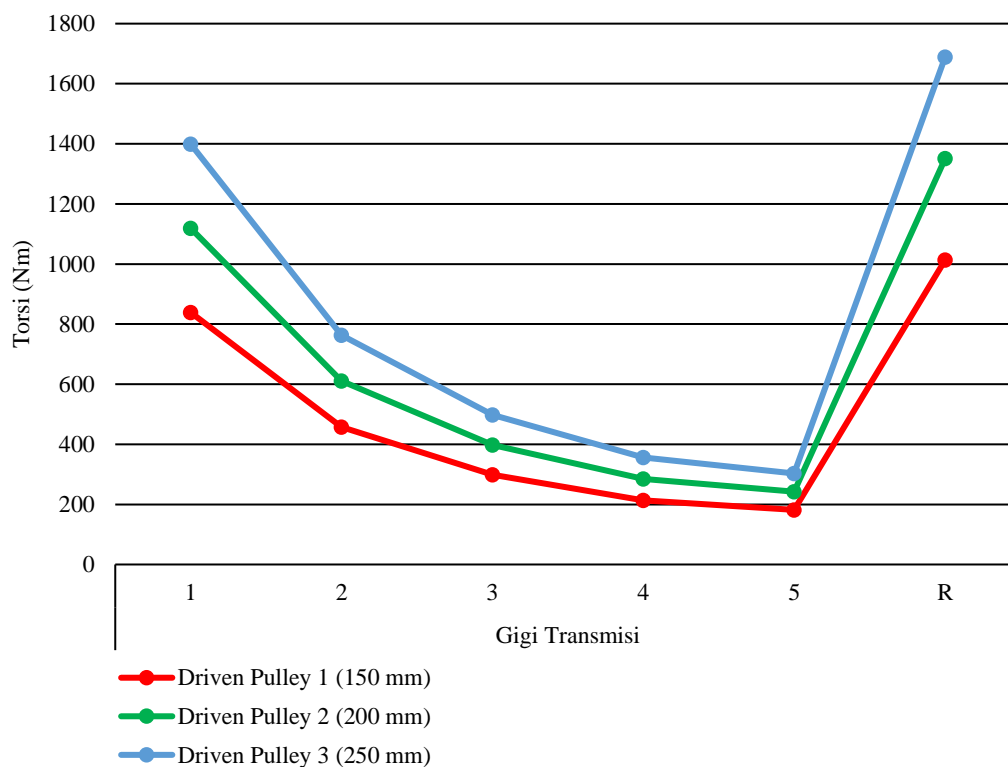
Hasil pengolahan data pada diagram pada Gambar 7 diperoleh berdasarkan Tabel 4, dijelaskan bahwa tinggi rendahnya kecepatan putar akhir dipengaruhi oleh ukuran diameter *driven pulley* (D_p) dan juga nilai perbandingan

roda gigi (*gear ratio*) pada transmisi itu sendiri. Berdasarkan nilai hasil perhitungan dan yang ditunjukkan diagram diatas, semakin kecil ukuran diameter *driven pulley*, kecepatan putar akhir yang dihasilkan akan semakin tinggi. Diagram tersebut menunjukkan *driven pulley* 1 menghasilkan putaran rpm yang sangat tinggi dibandingkan dengan *driven pulley* 2 dan *driven pulley* 3. Sedangkan untuk *driven pulley* 2 menghasilkan kecepatan putar akhir yang lebih tinggi dari *driven pulley* 3, tetapi masih dibawahnya *driven pulley* 1.

Pada dasarnya nilai perbandingan roda gigi memiliki peran yang berpengaruh terhadap hasil kecepatan putar akhir, dengan dibuktikannya hasil nilai perhitungan pada Tabel 2 dapat menunjukkan bahwasanya ukuran atau nilai perbandingan mempengaruhi nilai akhir yang dihasilkan. Nilai perbandingan roda gigi mendapatkan peranan mengkonversikan putaran rpm yang diperoleh dari poros masuk atau dari *driven pulley*. Jika gigi transmisi didapatkan nilai rasio yang kecil, maka kecepatan putar akhir yang dihasilkan akan semakin besar. Sebaliknya jika nilai rasio pada gigi sangat besar, maka menghasilkan kecepatan putar akhir yang pelan atau lambat. Sehingga, pada diagram di Gambar 7 menunjukkan setiap *driven pulley* menghasilkan kecepatan putar akhir yang sangat bervariasi, mengikuti jumlah dari gigi yang ada pada transmisi.

3.3 Akibat Ukuran *Driven Pulley* pada Torsi Akhir

Berdasarkan hasil percobaan, untuk menentukan akibat ukuran dari roda puli yang digerakkan (*driven pulley*) yang dihasilkan, maka dapat melihat pada diagram perbandingan dari ketiga variasi ukuran *pulley* seperti pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Diagram Perbandingan Hasil Nilai Torsi Akhir.

Berdasarkan hasil uji coba pada variasi ukuran *driven pulley* (D_p) terhadap torsi akhir yang dihasilkan dari setiap gigi transmisi dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan diagram, menunjukkan bahwa *driven pulley* 3 dengan ukuran diameter besar dapat menghasilkan nilai torsi akhir yang tinggi, sedangkan ukuran diameter *driven pulley* 1 yang lebih kecil menghasilkan torsi akhir yang kecil. Nilai torsi yang dihasilkan oleh setiap *driven pulley* akan dikonversikan lagi oleh nilai perbandingan roda gigi dari seriap jumlah gigi pada transmisi. Jika gigi transmisi memiliki nilai rasio yang besar, maka torsi akhir yang dihasilkan akan tinggi, dengan menerima torsi dari *driven pulley*.

Berdasarkan dari diagram tersebut, nilai torsi akhir yang dihasilkan dari gigi 1-5 mengalami penurunan nilai torsi. Penurunan nilai torsi akhir diakibatkan semakin kecilnya nilai rasio dari gigi 1 ke gigi 5. Sedangkan untuk nilai rasio dapat melihat pada Tabel 2 sebelumnya. Hal tersebut terjadi karena adanya pengkonversian tenaga putar oleh perbandingan ukuran atau jumlah gigi pada mekanisme penggerak dengan yang digerakkan, oleh sebab itu diperoleh hasil nilai akhir yang bervariasi dengan bantuan perhitungan teori rumus yang berlaku.

3.4 Analisa Berdasarkan Uji ANOVA

Tabel 6. Hasil Pengujian ANOVA Satu Jalur pada *Output* Kecepatan Putar Akhir.

ANOVA					
RPM					
	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F	SIG.
BETWEEN GROUPS	258453,856	2	129226,928	0,989	0,395
WITHIN GROUPS	1959514,893	15	130634,326		
TOTAL	2217968,749	17			

Pada hasil uji ANOVA satu jalur yang diperlihatkan pada Tabel 6 terhadap hasil kecepatan putar akhir dari setiap ukuran *driven pulley*, dapat ditunjukkan jika ingin mendefisikan H_0 akan diterima, untuk itu ketetapan nilai signifikansinya adalah $<0,05$ maka H_0 ditolak, sedangkan jika didapatkan nilai *Sig.* $>0,05$ maka H_0 diterima. Berdasarkan dari hasil diatas Tabel 6 didapatkan nilai signifikansi (*Sig.*) adalah $0,395 > 0,05$. Maka berarti H_0 diterima dan H_1 ditolak, sehingga dapat disimpulkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai kecepatan putar akhir rata-rata pada masing-masing diameter *pulley*.

Tabel 7. Hasil Pengujian ANOVA Satu Jalur pada Torsi Akhir.

ANOVA					
TORSI					
	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F	SIG.
BETWEEN GROUPS	334260,644	2	167130,322	0,747	0,491
WITHIN GROUPS	3355989,700	15	223732,647		
TOTAL	3690250,344	17			

Sedangkan pada hasil torsi akhir dari uji ANOVA satu jalur, pada Tabel 7 diketahui bilamana mendapatkan H_0 diterima sehingga ketentuannya jika nilai signifikansi $<0,05$ maka H_0 ditolak, sedangkan bila di dapat nilai signifikansi $>0,05$ maka H_0 diterima. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 7 didapatkan nilai signifikansi (*Sig.*) adalah $0,491 > 0,05$. Sehingga dari tabel tersebut diketahui H_0 diterima sedangkan H_1 ditolak. Maka diperoleh kesimpulan bahwa tidak terjadi perbedaan yang signifikan dari nilai torsi akhir terhadap rata-rata setiap masing-masing varian diameter *pulley*.

Bersumberkan nilai data hasil uji ANOVA terbukti bahwa diameter *driven pulley* yang di uji memiliki pengaruh terhadap hasil kecepatan putar dan torsi akhir, dengan perbandingan nilai antara setiap *driven pulley* yang tidak terlalu besar atau tidak terdapat perbedaan nilai yang signifikan dengan melihat hasil dari uji ANOVA di atas.

Kesimpulan

Didapatkan dari penelitian, percobaan, perhitungan dan hasil pembahasan, ukuran *driven pulley* memiliki pengaruh pada kecepatan putar akhir dan torsi akhir pada trainer transmisi milik *Toyota kijang innova* Tipe E 2.0 M/T. Berdasarkan hasil perhitungan memang ada perbedaan, namun jika dilihat dari kacamata statistik, perbedaan tersebut adalah kecil dan tidak signifikan.

Hasil dari kecepatan putar akhir yaitu diperoleh nilai 1339,5 rpm pada *driven pulley 1*, 1004,62 rpm pada *driven pulley 2*, dan 803,7 rpm pada *driven pulley 3*. Sehingga dinyatakan nilai kecepatan putar akhir terhadap ukuran *pulley* $D_{p1} > D_{p2} > D_{p3}$. Sedangkan, torsi akhir diperoleh nilai sebesar 1013,23 Nm pada *driven pulley 1*, 1350,97 Nm pada *driven pulley 2*, dan 1688,74 Nm pada *driven pulley 3*. Semakin kecil ukuran *driven pulley*, maka akan menghasilkan torsi yang kecil juga atau dapat diperjelas hasil nilai pada ukuran *pulley* $D_{p1} < D_{p2} < D_{p3}$.

Pada hasil uji ANOVA tidak terdapat perbedaan signifikan antara ketiga jenis variasi diameter *pulley*, ditunjukkan nilai *Sig.* 0,395 untuk kecepatan putar akhir dan *Sig.* 0,491 untuk torsi akhir.

Daftar Notasi

- GR_x = nilai gigi rasio
- z_x = jumlah gigi
- T_r = torsi rencana [Nm]
- n_x = kecepatan putar pada gigi [rpm]
- F = nilai gaya [N atau Newton]
- r = jari-jari diameter *pulley* [m]
- D_{px} = diameter *pulley* [m]
- P_d = daya yang direncanakan/motor penggerak [kW]

Daftar Pustaka

Aminullah, M., & Ansori, A. (2017). Rancang Bangun Trainer Transmisi Otomatis Tipe Planetary Gear. *JRM: Jurnal Rekayasa Mesin*, 04(02), 163-168.

- Editorial. (2019, November 20). *Sistem Transmisi*. Retrieved from Wikipedia: https://id.wikipedia.org/wiki/Sistem_transmisi
- Febrian, R. (2019, March 15). *Toyota New Kijang Innova E 2.0 M/T: Benar-Benar untuk Keluarga*. Retrieved from Berita Seputar Otomotif: <https://rajufebrian.wordpress.com/2009/03/15/toyota-new-kijang-innova-e-20-mt-benar-benar-untuk-keluarga/>
- Handoyo, E., Pramono, C., Salahudin, X., & Hastuti, S. (2019, Maret). Mesin Pengiris Pisang dengan Variasi Diameter Pulley Terhadap Putaran dan Tebal Irisan. *Jurnal Teknik Mesin*, 03(01), 29-35.
- Irawan, A. P. (2016). *Perencanaan Sistem Transmisi Roda Gigi*. Yogyakarta: Kanisius.
- Martono, N. (2016). *Metode Penelitian Kuantitatif: Analisis Isi dan Analisis Data Sekunder (Edisi Revisi 2)*. Jakarta: Rajawali Pers.
- Munandar, W. A., Indra, A., & Yendra, A. (2019, Oktober 10). Analisa Variasi Diameter Pully Terhadap Waktu Pemasakan Lempuk Durian Studi Kasus Pada Usaha Lempuk Durian "Citra Rasa". *Peningkatan Kemandirian Teknologi dan Bisnis Untuk Pembangunan Wilayah Pesisir*(2019: SNIT 2019), pp. 80-87.
- Narbuko, C., & Achmadi, A. (2013). *Metodologi Penelitian*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Pambudi, T. A., Pramono, G. E., & Yuliaji, D. (2019, Januari). Analisa Sistem Roda Gigi Diferensial Penggerak Roda Belakang Kendaraan Mobil Listrik (IKSA). *ALMIKANIKA*, 01(01), 27-34.
- Rosadi, M. M., Pramitasari, R. E., & Ramadani, A. H. (2019). Rancangan Sistem Penggerak Trainer Transmisi Manual 5 Percepatan Toyota Kijang. *Teknik Mesin*, 3-4.
- Sugiyono. (2015). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sularso, & Suga, K. 2013. *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Susanto, N., Purwaningsih, R., & Baharullah, I. A. (2017, September). Analisis Pengaruh Transmisi Mobil Manual dan Otomatis Terhadap Tingkat Kesulitan yang Dihadapi Pengemudi Pemula. *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 12(03), 197-205.
- Wakid, M. (2011). *Sistem Transmisi Kendaraan Ringan*. Yogyakarta: Skripta Media Creative.

Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator

Christiono¹, Miftahul Fikri¹, Dhami Johar Damiri¹, Muh. Rezha Safariansyah¹, Syahty Pratiwi¹, dan M. Reza Hidayat²

¹Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, DKI Jakarta, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

christiono@itpln.ac.id, miftahul@itpln.ac.id, dhami@itpln.ac.id, rezha1711059@itpln.ac.id,

syahty1971100@itpln.ac.id, mreza@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Salah satu pengaruh berkurangnya umur trafo ialah seringnya terjadi gangguan, gangguan yang dapat terjadi berupa terkontaminasinya minyak isolasi yang berdampak pada kerusakan transformator. Untuk mengurangi terjadi kerusakan maka dilakukan penelitian, pada penelitian kali ini dilakukan untuk melihat pengaruh kontaminan air yang terkandung dalam isolasi minyak transformator dengan menggunakan metode *Breakdown Voltage* dengan melihat nilai tegangan tembusnya. Minyak isolasi yang digunakan pada saat pengujian terdapat 2 jenis minyak, yaitu minyak mineral, dan nabati, sedangkan alat uji yang digunakan, yaitu *BAUR Oil Tester DPA* dengan standar alat uji IEC 60156:2018 yang disesuaikan dengan spesifikasi standar SPLN 49-1:1982 yang menyebutkan untuk minyak baru memiliki nilai tegangan tembus ≥ 30 kV/2,5 mm. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus yang dipengaruhi oleh kontaminan air yaitu semakin banyak kontaminan yang terkandung maka semakin cepat terjadinya penurunan nilai tegangan tembus. Dengan penelitian ini dapat menjadi indikasi untuk menjaga ketahanan transformator.

Kata kunci: Transformator, Minyak Isolasi, Tegangan Tembus

Abstract

One of the effects of reduced transformer life is the frequent occurrence of disturbances, disturbances that can occur in the form of contamination of insulating oil which has an impact on transformer damage. To reduce the damage, a research was carried out, in this study it was carried out to see the effect of water contaminants contained in the insulation of transformer oil using the Breakdown Voltage method by looking at the value of the translucent voltage. There are 2 types of insulating oil used during testing, mineral, and vegetable oil, while the test equipment used is the BAUR Oil Tester DPA, with the standard IEC 60156:2018 test equipment. Which is adapted to the standard specification SPLN 49-1:1982 which states that new oil has a breakdown voltage value of 30 kV/2.5 mm. The results of the test show that the breakdown voltage value is influenced by water contaminants where the more contaminants contained, the faster the breakdown voltage value will decrease. This research can be an indication to maintain the transformer resistance.

Keywords: Transformer, Insulating Oil, Break Voltage

1. Pendahuluan

Transformator merupakan peralatan listrik yang dapat menaikkan maupun menurunkan tegangan, yang bekerja berdasarkan prinsip induksi (Siburian, 2019). Salah satu bagian dari transformator, yaitu minyak transformator, minyak isolasi digunakan agar tidak terjadi gesekan antara yang bertegangan (PT.PLN Persero, 2014) (Widiyantoro et al., 2020). Kandungan dari minyak trafo terdiri dari senyawa hidrokarbon *paraffin* (C_nH_{2n+2}), *naphthalene* (C_nH_{2n}) dan *aromatic* (C_nH_n) (Sharma et al., 2020) (Putra & Murdiya, 2017). Minyak transformator terdiri dari beberapa jenis minyak isolasi, yaitu minyak mineral, dan minyak nabati. Minyak mineral merupakan minyak isolasi yang berasal dari proses destilasi, agar mendapatkan tahanan isolasi pada minyak tinggi, dan panas minyak isolasi stabil. Sedangkan, minyak nabati didapatkan dari ekstraksi berbagai macam tumbuhan, minyak nabati sering dijadikan alternatif pengganti minyak isolasi mineral karena mudah didapatkan dan juga ramah lingkungan (Jumardin et al., 2019). Adapun spesifikasi minyak isolasi baru menurut IEC 60296:2003 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Minyak isolasi yang baik memiliki nilai dielektrik dan nilai tegangan tembus yang baik. Tegangan tembus merupakan tegangan listrik yang ketika isolator tidak dapat menghadapi tekanan medan listrik pada elektroda yang memiliki beda potensial sehingga isolator tidak mampu lagi mengisolasi atau dapat berubah menjadi konduktor. Ketika nilai tegangan tembus kecil maka terdapat gangguan. Gangguan yang terjadi pada minyak isolasi transformator dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, salah satunya karena adanya kontaminan pada minyak isolasi tersebut (Maneerot & Pattanadech, 2019). Kontaminan tersebut

Info Makalah:

Dikirim : 02-18-22;

Revisi 1 : 04-11-22;

Diterima : 04-18-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 853-9858-4508

e-mail : christiono@itpln.ac.id

biasanya berupa kontaminan cair, terdapatnya air di dalam minyak isolasi disebabkan oleh beberapa faktor eksternal maupun internal seperti, pada saat terjadi hujan maka air tersebut dapat masuk ke dalam transformator, dan ketika suhu di dalam transformator tinggi sedangkan suhu pada sekitar transformator lebih rendah atau sebaliknya akan mengakibatkan adanya uap air (Karim, 2018). Keberadaan air ini sangat mempengaruhi kondisi baik atau tidaknya minyak isolasi transformator (Winanta et al., 2019). Air bersifat elektrolisis, yang di mana jika air yang terdapat dalam suatu wadah dialiri arus melalui elektroda menyebabkan adanya proses kimiawi (Siregar et al., 2020). Bahan isolasi akan mengalami tekanan medan elektrik ketika berada di antara elektroda yang tegangannya berbeda (Syuhada et al., 2021). Ion-ion air yang mengontaminasi minyak isolasi akan terurai atau tidak dapat menyatu dengan minyak tersebut. Ketika ada arus mengalir melalui inti besi maka air akan bersifat sebagai konduktor yang menyebabkan timbulnya garis yang membuat terjadinya percikan api (*sparkover*), loncatan listrik (*flashover*), hingga *breakdown voltage* (Rahman et al., 2015).

Tabel 1. Spesifikasi Minyak Isolasi Baru Menurut IEC 60-296:2003

No.	Parameter Uji	Batasan
1	Viskositas 40°C	Max. 12cSt
2	Titik Tuang	Max. -40°C
3	Kadar Air	Max. 30mg/kg
4	Tegangan Tembus : Sebelum <i>Treatment</i> Setelah <i>Treatment</i>	Min. 30kV/2,5mm Min. 70kV/2,5mm
5	Densitas pada 20°C	Max. 0,895 g/cm ³
6	Kenetralan	Max. 0,01 mgKOH/kg

Berdasarkan penjelasan di atas, maka dilakukan penelitian dengan melakukan pengujian tegangan tembus pada minyak isolasi transformator berjenis minyak nabati dan minyak mineral yang dipengaruhi oleh kontaminan cair. Di mana minyak nabati yang digunakan berjenis minyak dedak padi (tipe minyak murni, dan tipe minyak makan), sedangkan minyak mineral yang digunakan berjenis *hyrax*. Adapun data yang diujikan yaitu pengaruh kontaminan air terhadap tegangan tembus berdasarkan standar dari IEC dan SPLN. Kontaminan air yang digunakan berupa air suling (H₂O) yang diberikan sebesar 1 mL hingga 10 mL. Dalam penelitian ini pengujian dilakukan di Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi menggunakan alat Baur Oil Tester DPA, sesuai dengan standar IEC 60156:2018 yaitu elektroda yang digunakan berbentuk elektroda setengah bola dengan jarak antar elektroda 2,5mm.

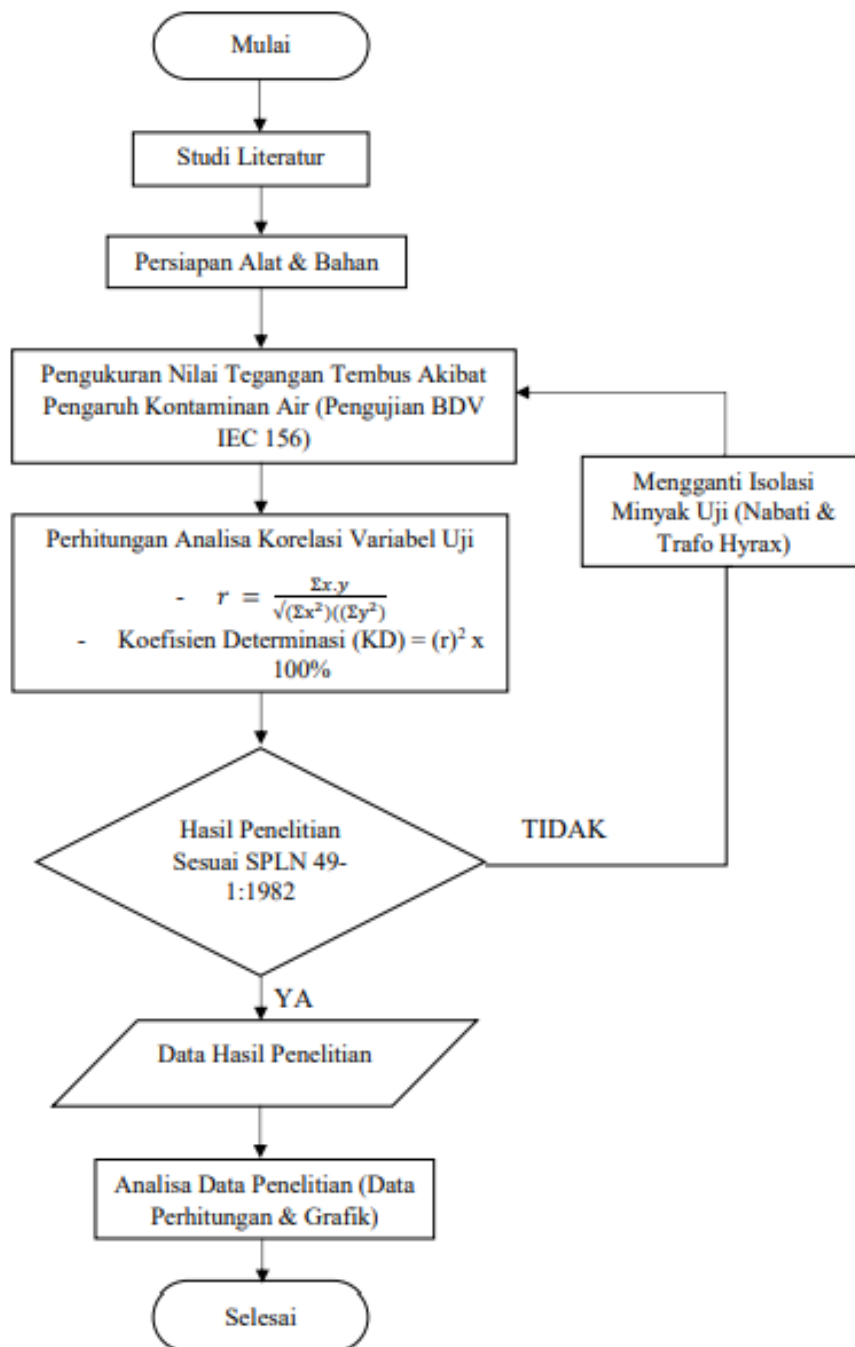
2. Metode Penelitian

Pengujian dilakukan di Kampus Institut Teknologi PLN pada ruang Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi. Pengujian ini berdasarkan judul “Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral Dan Nabati Sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator”. Hasil dari pengujian minyak isolasi trafo yang digunakan yaitu minyak nabati jenis dedak, dan juga minyak transformator *hyrax* dengan kondisi baru, dengan nilai tegangan tembusnya disesuaikan dengan spesifikasi minyak isolasi baru berdasarkan SPLN 49-1:1982. Pengukuran nilai kontaminasi dari air yang diberikan mulai dari 1ml hingga 10 mL untuk dilakukannya analisis yang berpengaruh pada perhitungan nilai tegangan tembus. Pada pengujian tegangan tembus, dengan menggunakan alat uji *Baur Oil Tester DPA*.



Gambar 1. Alat Uji *Oil Tester DPA*

Di mana berdasarkan pada standar IEC 60-156:2018 yang menggunakan elektroda berbentuk setengah bola dengan jarak sela 2,5 mm. Setiap pengujian tegangan tembus, dilakukan pengujian sebanyak 6 kali, hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai rata-rata dari suatu pengujian tegangan tembus, dengan jeda waktu selama 1 menit. Berikut ini alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Penelitian

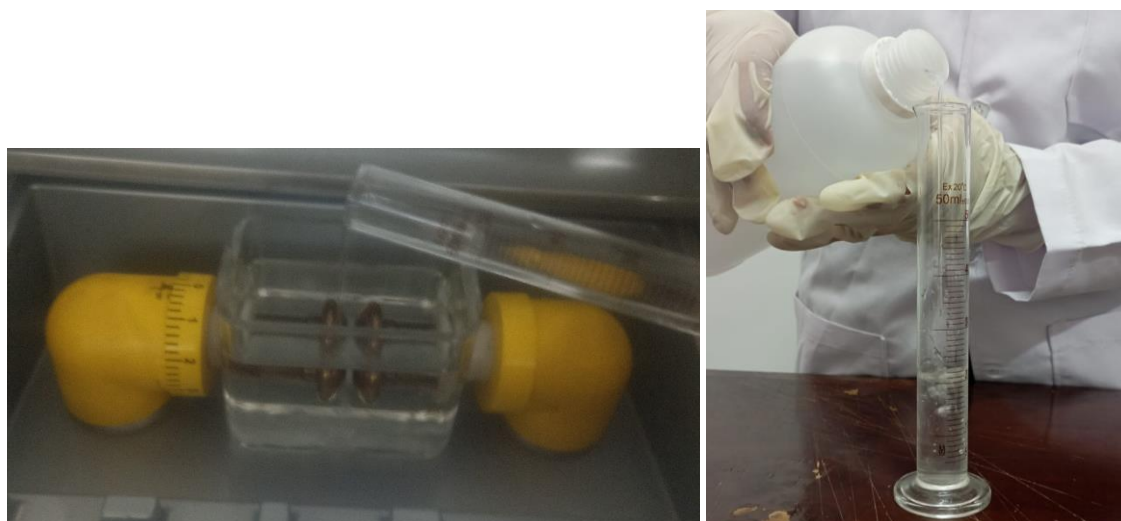
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Nilai Tegangan Tembus Isolasi Minyak Sampel Uji

Air yang mengontaminasi minyak isolasi transformator dapat berpengaruh banyak dalam sistem isolasinya, salah satu pengaruhnya, yaitu ketika air dan oksigen masuk ke dalam transformator dapat menghasilkan asam yang akan menyebabkan bagian dalamnya mengalami peningkatan sifat korosif, dan juga air berefek merusak kertas isolasi yang berfungsi untuk melindungi inti besi dan kumparan suatu transformator, dan memiliki kemampuan mekanis. Berikut

ini hasil pengujian kontaminan air pada minyak isolasi nabati jenis dedak padi tipe murni, dedak padi tipe *food oil*, dan minyak mineral *hyrax*. Pengujian ini berdasarkan standar IEC 156 mengenai pengujian *breakdown voltage*, dan nilai kontaminan air suling yang diberikan dimulai dari 1 mL hingga 10 mL.

Pada pengukuran nilai tegangan tembus minyak isolasi dedak padi (tipe murni & *food oil*), dan minyak isolasi *hyrax* dengan pengaruh kontaminan air suling didapatkan hasil, yaitu ketika kontaminan air di berikan semakin banyak maka akan mempengaruhi nilai tegangan tembus semakin mengecil. Pada alat uji *BAUR Oil Tester DPA* dapat menampung sekitar 450 mL cairan sampel uji, yang membuat kontaminan yang terdapat dalam wadah akan mempercepat terjadinya kegagalan isolasi. Pada pengukuran kontaminan air digunakan alat gelas ukur agar pengukuran banyaknya mililiter air sesuai.



Gambar 3. Pengujian Pengaruh Kontaminan Air(H₂O) Terhadap Isolasi Minyak Sampel Uji Dengan *BAUR Oil Tester DPA*

3.2. Perhitungan Analisa Korelasi Variabel Uji

Perhitungan korelasi dilakukan untuk mengetahui keterkaitan tiap parameter yang diujikan terhadap semua sampel minyak isolasi yang digunakan. Analisa korelasi dilakukan terhadap pengaruh kontaminan terhadap nilai tegangan tembus isolasi minyak yang diujikan (La'ia & Harefa, 2021). Di mana nilai koefisien relasi (r) berentang -1 hingga 1, dan arah korelasi dinyatakan dalam positif (+) dan negatif (-), selain menghitung korelasi juga melakukan perhitungan koefisien determinasi untuk mengetahui persentase variabel pengujian. Adapun perhitungan korelasi dilakukan dengan metode *pearson*.

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (1)$$

$$KD = (r)^2 \times 100\% \quad (2)$$

Berikut perhitungan nilai korelasi pengaruh kontaminan air suling (H_2O) terhadap nilai tegangan tembus untuk isolasi minyak dedak padi tipe murni

$$r = \frac{-133,45}{\sqrt{(82,5)(246,77)}} = -0,93 \quad (3)$$

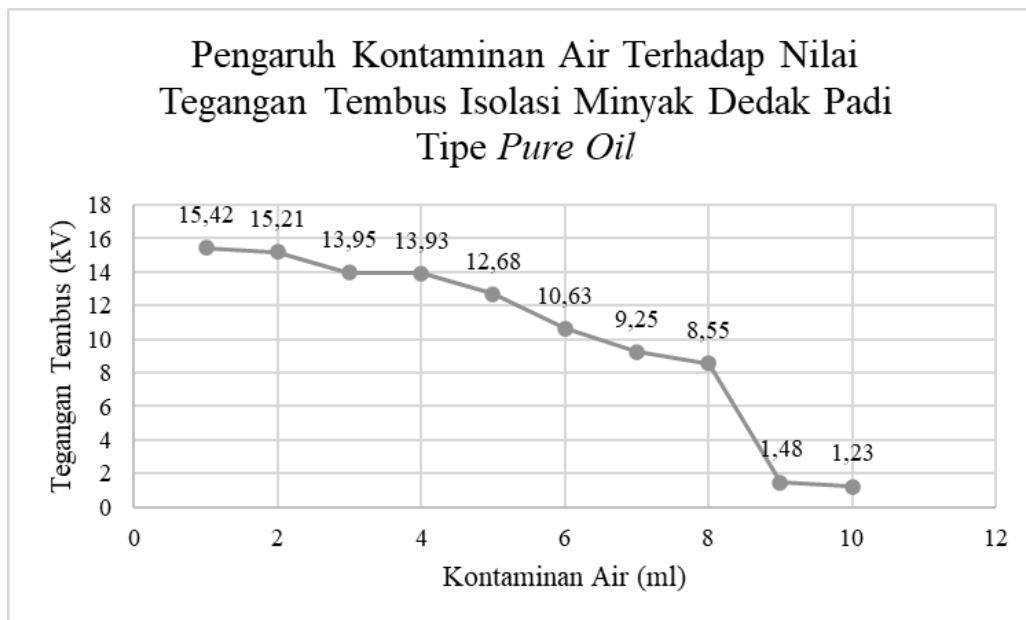
$$KD = (r)^2 \times 100\% = 87,48\% \quad (4)$$

Dari perhitungan menggunakan persamaan 4 didapatkan data analisis korelasi analisis pengaruh kontaminan air suling (H_2O) terhadap nilai tegangan tembus minyak dedak padi tipe murni. Berikut data korelasi pengaruh kontaminan terhadap nilai tegangan tembus yang ditunjukkan pada Tabel 2.

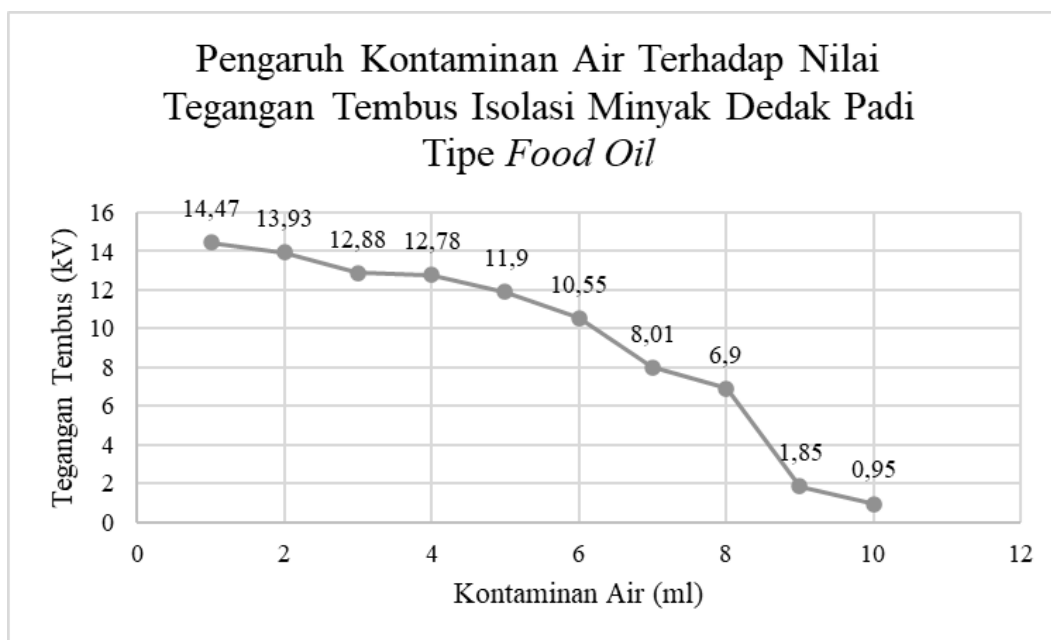
Tabel 2. Data Perhitungan Korelasi Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Nilai Tegangan Tembus Isolasi Minyak Dedak Padi Tipe Murni

X1	Y1	(X1-Xrat) =X	(Y1-Yrat) =Y	X ²	Y ²	XY
1	15,42	-4,5	5,187	20,25	26,90497	-23,3415
2	15,21	-3,5	4,977	12,25	24,77053	-17,4195
3	13,95	-2,5	3,717	6,25	13,81609	-9,2925
4	13,93	-1,5	3,697	2,25	13,66781	-5,5455
5	12,68	-0,5	2,447	0,25	5,987809	-1,2235
6	10,63	0,5	0,397	0,25	0,157609	0,1985
7	9,25	1,5	-0,983	2,25	0,966289	-1,4745
8	8,55	2,5	-1,683	6,25	2,832489	-4,2075
9	1,48	3,5	-8,753	12,25	76,61501	-30,6355
10	1,23	4,5	-9,003	20,25	81,05401	-40,5135

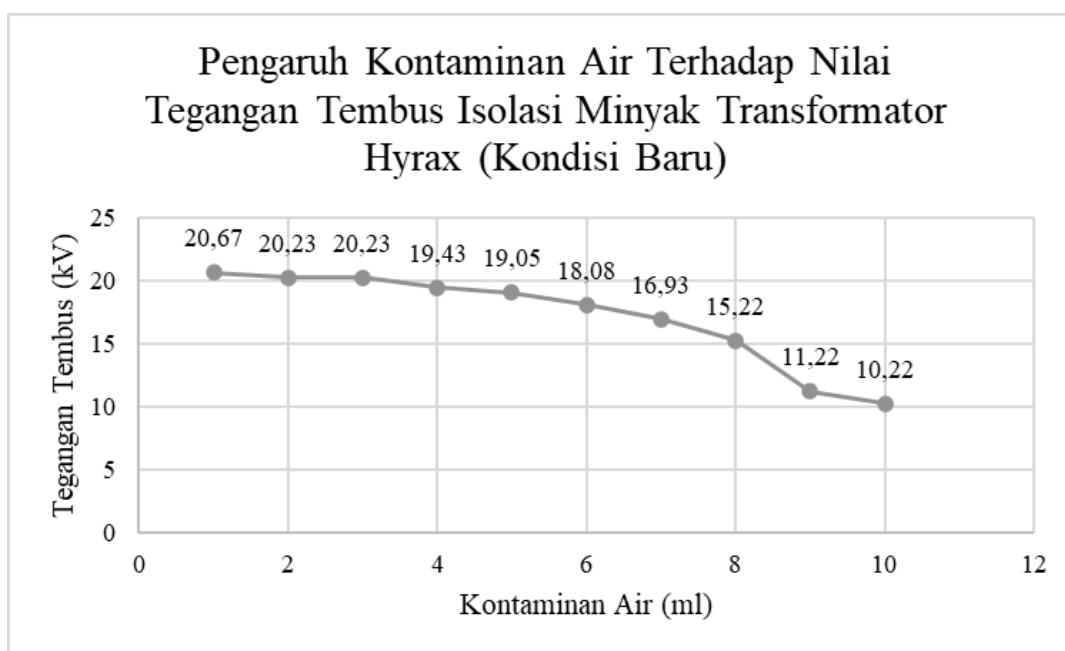
Berikut grafik pengaruh kontaminan terhadap nilai tegangan tembus isolasi minyak berjenis dedak padi tipe minyak murni, dedak padi tipe minyak makan, dan minyak *hyrax* yang ditunjukkan pada Gambar 4 s.d Gambar 6.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Minyak Dedak Padi Tipe Murni



Gambar 5. Grafik Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Minyak Dedak Padi Tipe Minyak Makan



Gambar 6. Grafik Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Minyak Transformator *Hyrax* (Kondisi Baru)

Nilai tegangan tembus didapatkan dari pengujian tegangan tembus dengan menggunakan alat uji *Baur Oil Tester DPA*, yang berdasarkan standar IEC 60-156:2018, menunjukkan penggunaan dari elektroda di alat uji ini menggunakan elektroda setengah bola dengan bahan tembaga, dan jarak antar elektroda atau tebal isolasi yang diberikan sebesar 2,5mm. Pengujian tegangan tembus ini dilakukan sebanyak 6 kali pada tiap parameternya agar mendapatkan nilai rata-rata yang digunakan sebagai nilai dari tegangan tembusnya, dengan waktu jeda selama 1 menit. Kontaminan air yang diberikan pada isolasi minyak transformator sebanyak 1mL hingga 10mL, untuk melihat perbandingan dari tegangan tembus yang akan dihasilkan.

Pada grafik data hasil pengujian nilai tegangan tembus yang dipengaruhi oleh kontaminan pada minyak isolasi dedak, dan *hyrax*. Semakin banyak kontaminan pada isolasi minyak maka akan semakin cepat terjadinya tegangan tembus, yang membuat nilai tegangan tembus yang terukur rendah. Pada data pengujian minyak dedak padi tipe minyak makan, ketika kontaminan air yang diberikan sebesar 1 mL hingga 2 mL isolasi minyak dedak padi tipe

minyak makan masih dapat menahan tegangan tinggi sehingga tegangan tembus masih terukur seperti pada pengujian tanpa kontaminan dan isolasi minyak nabati tersebut masih dapat melakukan *self healing* atau memperbaiki diri ketika dipengaruhi kontaminan, sehingga tegangan tembus yang terukur cenderung konstan. Namun, pada saat kontaminan 3 mL hingga 9 mL nilai tegangan tembusnya terus mengalami penurunan, dan ketika 10 mL dengan perbandingan 45:1 isolasi cair terhadap jumlah kontaminannya tegangan tembus jatuh pada angka 0,95 kV sehingga isolasi minyak dapat dikatakan telah terkontaminasi dan tidak mampu lagi menahan tegangan tinggi. Sedangkan pada data minyak uji lainnya, nilai dari tegangan tembus berbanding terbalik dengan jumlah kontaminan yang diberikan. Ketika terdapat kandungan air dalam isolasi mempercepat pemburukan dari isolasi minyak tersebut.

Pada saat pengujian kontaminan air mengendap di bawah bejana, sehingga nilai tegangan tembus yang terukur memiliki selisih yang tidak terlalu jauh setiap penurunan akibat pengaruh kontaminan. Apabila jumlah kontaminan air semakin bertambah, maka semakin rendahnya nilai tegangan tembus yang dihasilkan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan adanya kontaminan air dalam penggunaan isolasi pada transformator yang dapat memperburuk sistem isolasi transformator dan maka akan mempercepat terjadinya pelepasan muatan hingga terjadilah *breakdown* atau kegagalan isolasi minyak. Air suling (H_2O) merupakan senyawa *kovalen polar* sehingga air dapat menghantar arus. Ketika pada minyak isolasi transformator memiliki kandungan air, maka dapat dilakukan tindakan rekomendasi, seperti melakukan pemeliharaan berkala, rekondisi, hingga penggantian minyak isolasi baru.

3.3. Pembahasan

Setelah pengujian dilakukan akan didapatkan data perhitungan dari variabel yang telah diuji pada minyak dedak padi tipe murni, minyak dedak padi tipe minyak makan, dan juga minyak isolasi *hyrax* yang digunakan sebagai pembanding dari kelayakan minyak nabati. Selanjutnya akan membahas mengenai pengaruh kontaminan air terhadap nilai tegangan tembus yang ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan data pengaruh kontaminan air terhadap nilai tegangan tembus dari tiap sampel minyak isolasi yang diujikan dapat dimuat dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 7.

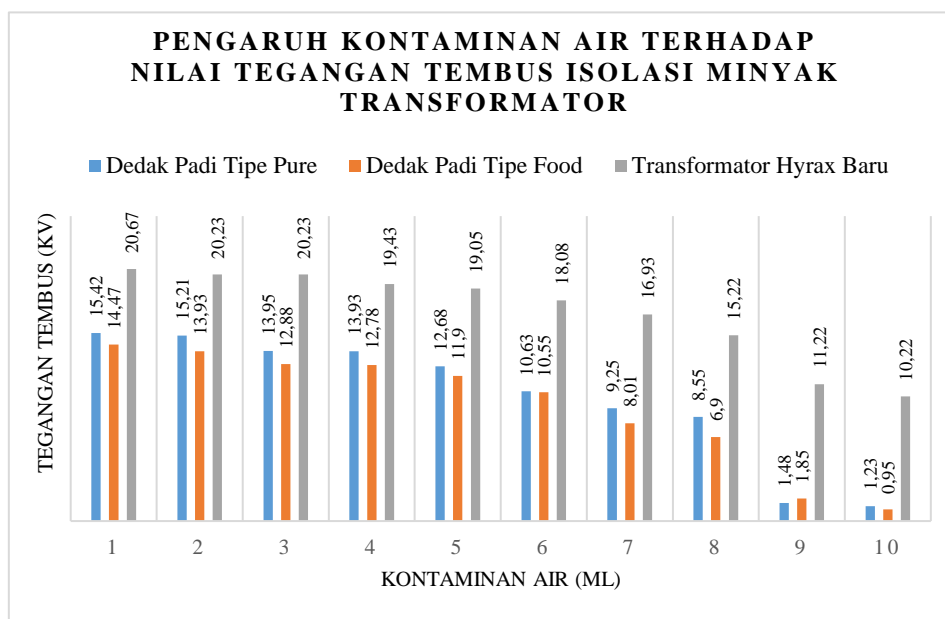
Tabel 3. Data Pengujian Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Minyak Uji Dengan Tebal Isolasi 2,5 mm

No.	Minyak/Type	Jumlah Kandungan Air (mL)	Nilai Tegangan Tembus (kV)
1.	Dedak Padi/ <i>Pure Oil</i>	1	15,42
		2	15,21
		3	13,95
		4	13,93
		5	12,68
		6	10,63
		7	9,25
		8	8,55
		9	1,48
		10	1,23
2.	Dedak Padi/ <i>Food Oil</i>	1	14,47
		2	13,93
		3	12,88
		4	12,78
		5	11,9
		6	10,55
		7	8,01
		8	6,9
		9	1,85
		10	0,95
3.	<i>Hyrax/Transformator Oil</i>	1	20,67
		2	20,23
		3	20,23
		4	19,43
		5	19,05
		6	18,08
		7	16,93
		8	15,22
		9	11,22
		10	10,22

Pada pengujian tegangan tembus dengan menggunakan alat *BAUR Oil Tester DPA* dengan wadah atau bejana pada alat tersebut dapat menampung 450 mL cairan sampel uji. Berdasarkan grafik pengaruh kontaminan air (H_2O) terhadap

nilai tegangan tembus isolasi minyak nabati dedak padi dengan tipe murni, minyak dedak padi dengan tipe minyak makan, dan isolasi minyak transformator mineral dengan merek *hyrax* dalam kondisi baru didapatkan hasil bahwa setiap kenaikan jumlah kontaminan air yang terkandung dalam isolasi minyak yang diujikan menunjukkan nilai tegangan tembus yang semakin turun. Ketika minyak dedak padi *Tipe Pure* diberikan kontaminan air sebanyak 1ml tegangan tembus yang dihasilkan di bawah dari standar yang telah ditentukan, di mana semakin banyak jumlah kontaminan air yang diberikan pada minyak dedak *Pure* tegangan tembus yang dihasilkan semakin kecil hingga 1,23kV. Begitu juga pada minyak dedak *Tipe Food* semakin banyaknya air yang diberikan pada minyak isolasi tersebut, semakin rendah nilai tegangan tembus yang dihasilkan hingga tidak dapat mengisolasi peralatan dengan besar 0,95kV. Pada minyak isolasi *hyrax* yang dipengaruhi kontaminan air dengan parameter hingga 10ml tegangan tembus yang dihasilkan di bawah dari standar yang sesuai hanya mendapatkan nilai tegangan tembus 20,67kV hingga 10,22kV.

Air suling (H_2O) merupakan air yang dimurnikan dengan cara destilasi untuk menghilangkan partikel atau kontaminan yang terdapat dalam air tersebut. Air suling terdiri dari atom O (*Oksigen*), dan atom H (*Hidrogen*). Untuk mencapai kestabilan oktet atom O membutuhkan 2 elektron, sedangkan atom H membutuhkan 1 elektron untuk mencapai kestabilan duplet, sehingga atom O akan berikatan dengan 2 atom H sehingga atom O mendapatkan 2 elektron dari atom H, dan tersisa 4 elektron yang tidak berikatan atau 2 pasang elektron bebas sehingga air suling termasuk ke dalam senyawa kovalen polar sehingga bersifat elektrolisis dan dapat dipengaruhi oleh aliran listrik. Dalam penggunaan isolasi pada transformator terdapat kontaminan air maka sistem isolasi tersebut akan rendah atau buruk, karena air bersifat elektrolisis yang membuat air dapat menghantarkan arus, sehingga ketika pengujian tegangan tembus dilakukan dan terdapat kontaminan air maka dapat mempercepat terjadinya tegangan tembus. Salah satu penyebab kegagalan isolasi cair karena adanya molekul air yang mengontaminasi isolasi, molekul air tersebut akan membentuk *spheroid*.



Gambar 7. Grafik Batang Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Isolasi Minyak Uji

Berdasarkan dari data dan hasil pengukuran setiap adanya pengaruh kandungan kontaminan nilai tegangan tembus akan turun sesuai dengan standarisasi isolasi minyak yang baik dan layak menurut SPLN 1982 yang menyatakan bahwa isolasi minyak tidak boleh mengandung air. Sehingga ketika terdapat kandungan air dalam isolasi mempercepat pemburukan dari isolasi minyak tersebut. Namun dari hasil pengaruh kontaminan ini dapat diketahui kekuatan tiap isolasi minyak yang diuji dalam menghadapi kontaminan, dari setiap isolasi minyak hanya minyak transformator yang nilai kekuatan yang baik dalam menahan pengaruh kontaminan, dikarenakan ketika kontaminan sebesar 1 hingga 10 mL diberikan nilai tegangan tembus minyak transformator *hyrax* cenderung konstan sehingga isolasi minyak transformator *hyrax* tidak mudah untuk terkontaminasi air, namun tiap kenaikan jumlah kontaminan yang terkandung nilai tegangan tembus yang terukur semakin turun juga tetapi selisih tiap nilai tegangan tembusnya tidak begitu jauh seperti isolasi minyak nabati. Sampel minyak nabati yang lainnya yaitu minyak dedak padi dengan tipe minyak murni dan minyak makan cenderung mudah terkontaminasi sehingga nilai tegangan tembus yang terukur memiliki selisih yang signifikan tiap jumlah kontaminan yang diberikan. Dalam hal ini dapat disimpulkan isolasi minyak yang baik harus kuat dalam mengalami kontaminan air agar tidak mudah terjadi kegagalan isolasi. Karena, apabila terdapat kontaminan air akan mempercepat kerusakan transformator karena akan merusak isolator kertas yang melindungi inti

dan kumparan dalam transformator, serta dapat mempercepat nilai tegangan tembus, karena molekul air yang terkandung akan mudah dipengaruhi oleh aliran medan listrik (GGL) ketika transformator bekerja.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pengaruh kontaminan air pada nilai tegangan tembus isolasi minyak jenis nabati, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Air suling (H_2O) merupakan senyawa *kovalen* yang dalam hal ini memiliki pasangan elektron bebas, sehingga apabila terdapat muatan listrik, maka air akan bersifat elektrolisis atau dapat menghantarkan muatan, sehingga pada pengujian tegangan tembus, semakin banyak kontaminan air yang terkandung dalam isolasi minyak, semakin mempercepat terjadinya tegangan tembus atau kegagalan isolasi.
- Semakin banyaknya jumlah kontaminan air yang diberikan pada minyak isolasi transformator membuat nilai tegangan tembus yang dihasilkan akan semakin menurun, dengan nilai tegangan tembus pada suatu isolasi minyak transformator memiliki standar nilai tegangan tembus >30 kV/2,5 mm.
- Berdasarkan perhitungan analisis korelasi dengan metode *Pearson Product Moment* (PPM) dengan menghitung nilai koefisien korelasi dan persentase korelasi, didapatkan korelasi kontaminan air terhadap tegangan tembus berbanding terbalik dengan tingkat korelasi tinggi.
- Hasil penelitian yang didapatkan belum ada isolasi yang memenuhi semua parameter uji, tebal isolasi sesuai IEC 156 sebesar 2,5 mm.
- Hasil pengujian menggunakan minyak dedak padi tipe *pure* yang diberikan kontaminan sebanyak 1 mL didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 15,42 kV. Sedangkan nilai tegangan tembus ketika diberi kontaminan 2 mL sebesar 15,21 kV, kontaminan 3 mL sebesar 13,95 kV, kontaminan 4 mL sebesar 13,93 kV, kontaminan 5 mL sebesar 12,68 kV, kontaminan 6 mL sebesar 10,63 kV, kontaminan 7 mL sebesar 9,25 kV, kontaminan 8 mL sebesar 8,55 kV, kontaminan 9 mL sebesar 1,48 kV, dan kontaminan 10 mL nilai tegangan tembus sebesar 1,23 kV.
- Pada pengujian menggunakan minyak dedak padi tipe *food* yang diberikan kontaminan air suling sebanyak 1 mL didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 14,47 kV. Ketika diberi kontaminan sebanyak 2 mL didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 13,93 kV. Ketika kontaminan yang diberikan sebanyak 3 mL, 4 mL, 5 mL, 6 mL, 7 mL, 8 mL, 9 mL, hingga 10 mL, didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 12,88 kV, 12,78 kV, 11,9 kV, 10,55 kV, 8,01 kV, 6,9 kV, 1,85 kV, dan 0,95 kV.
- Hasil pengujian menggunakan minyak *hyrax* baru yang diberikan kontaminan sebanyak 1 mL, 2 mL, 3 mL, 4 mL, 5 mL, 6 mL, 7 mL, 8 mL, 9 mL, 10 mL, didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 20,67 kV, 20,23 kV, 20,23 kV, 19,43 kV, 19,05 kV, 18,08 kV, 16,93 kV, 15,22 kV, 11,22 kV, 10,22 kV.
- Setiap kenaikan 1 mL kontaminan air yang terlarut pada minyak isolasi mampu menurunkan $\pm 5\%$ dari kekuatan dielektriknya. Dalam penelitian ini terlihat jelas penurunan yang signifikan terjadi pada minyak tipe nabati.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Laboratorium Teknologi & Peralatan Tegangan Tinggi Institut Teknologi PLN Jakarta, yang telah memberikan saya kesempatan untuk mengambil data terkait penelitian pengujian pengaruh kontaminan air pada tegangan tembus isolasi minyak jenis nabati dan mineral.

Daftar Notasi

- r = Nilai koefisien korelasi
 $\sum XY$ = Hasil Perkalian dari Total Jumlah Variabel X dan Variabel Y
 $\sum X^2$ = Kuadrat dari Total Jumlah Variabel X
 $\sum Y^2$ = Kuadrat dari Total Jumlah Variabel Y
 X^2 = Data variabel yang dibandingkan (parameter kontaminan yang diberikan)
 Y^2 = Data variabel yang dibandingkan (nilai tegangan tembus yang dihasilkan)
 KD = Koefisien\ Determinasi
 r^2 = Kuadrat nilai koefisien korelasi

Daftar Pustaka

- Jumardin, J., Ilham, J., & Salim, S. (2019). Studi Karakteristik Minyak Nilam Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 1(2), 40–48. <https://doi.org/10.37905/jjee.v1i2.2881>

- Karim, S. (2018). Pengaruh Kondisi Minyak Terhadap Keandalan Sistem Kerja Transformator (Studi Kasus Di Pt. Indocement Tunggul Prakarsa, Tbk. Plant 12 Tarjun – Kalimantan Selatan) Tahun. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 1(2), 41–52.
- La'ia, H. T., & Harefa, D. (2021). Hubungan Kemampuan Pemecahan Masalah Matematis dengan Kemampuan Komunikasi Matematik Siswa. *Aksara: Jurnal Ilmu Pendidikan Nonformal*, 7(2), 463. <https://doi.org/10.37905/aksara.7.2.463-474.2021>
- Maneerot, S., & Pattanadech, N. (2019). Effect of contaminant on breakdown characteristics of mineral oil and commercial natural ester. *ECTI-CON 2018 - 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 688–691. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2018.8619864>
- PT.PLN Persero. (2014). *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*.
- Putra, R. K., & Murdiya, F. (2017). Karakteristik Tegangan Tembus Arus Bolak Balik Pada Minyak Jarak Pagar (*Jatropha curcas*) Sebagai Alternatif Isolasi Cair. *Jom FTEKNIK*, 4(2), 1–11.
- Rahman, R. A., Paronda, A. H., & Marini, S. (2015). Analisis Pengaruh Kadar Air Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Dan Dielektrik Isolasi Pressboard Tipe B.3.1. *Journal of Electrical and Electronics*, 6(1), 43–52.
- Sharma, P., Agarwal, R., Uppal, A., Narasimhan, C. S., Beldar, S. S., & Velandy, J. (2020). Effect of aromatics and polar contaminant of natural ester oil on dielectric strength and breakdown time in mineral oil under lightning impulse voltage excitations. *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India International Conference*. <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9113010>
- Siburian, J. (2019). Karakteristik transformator. *Jurnal Teknologi Energi UDA*, VIII(21), 21, 23.
- Siregar, M. A., Umurani, K., & Damanik, W. S. (2020). Pengaruh Jenis Katoda Terhadap Gas Hidrogen Yang Dihasilkan Dari Proses Elektrolisis Air Garam. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 21(2), 57–65. <https://doi.org/10.23917/mesin.v21i2.10386>
- Syuhada, D. I. O. A., Koerniawan, T., & Christiono, C. (2021). *Kajian Tegangan Tembus Dan Medan Listrik Pada Elektroda Model Tembaga Dan Aluminium Pada Media Isolasi Udara (Doctoral Dissertation, Institut Teknologi Pln)*.
- Widiyantoro, B., Christiono, C., & Junaidi, A. (2020). *Analisis Kemampuan Minyak Isolasi Transformator Daya Merek UNINDO dengan Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Pengujian Breakdown Voltage di Gardu Induk Serpong*.
- Winanta, I. N. O., Agung, A., Amrita, N., & Ariastina, W. G. (2019). Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Jurnal SPEKTRUM*, 6(3), 11–28.

Kajian Optimasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan

Agustin Purwanti¹, Roni Farfian¹, Chairunnisa¹, Rifaldi Aji Sarifudin¹, dan Aditya Wisnu M.P¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

Agustinpwt57@gmail.com, Roni.farfian@lecture.unjani.ac.id, Chairunnisa@lecture.unjani.ac.id,

Rifaldiaji81@gmail.com, Adityawmp@gmail.com

Abstrak

Danau Tempe merupakan danau paparan banjir di Provinsi Sulawesi Selatan yang dikelilingi tiga kabupaten yaitu Sidrap, Soppeng, dan Wajo. Kapasitas Danau Tempe dipengaruhi oleh *inflow* yang masuk ke danau. Dalam mendukung operasional pemanfaatan dan konservasi air, telah dibangun Bendung Gerak Tempe untuk mengatur dan mempertahankan tinggi muka air (TMA) di danau. Intensitas hujan yang tinggi menyebabkan air danau meluap dan membanjiri daerah sekitar danau sehingga menimbulkan kerugian materiil yang besar. Untuk mengurangi genangan banjir tersebut, dilakukan kajian optimasi kapasitas Danau Tempe. Optimasi dilakukan dengan mengatur tinggi bukaan pintu yang optimal pada Bendung Gerak Tempe menggunakan model hidrologi. Pada kajian ini digunakan nilai *curve number* (CN) dari sungai-sungai yang mengalir ke danau, yang merupakan fungsi dari 2 skenario tutupan lahan yaitu kondisi saat ini dan rencana RTRW Provinsi Sulawesi Selatan. Berdasarkan pemodelan hidrologi didapatkan *inflow* Danau Tempe berupa debit puncak periode ulang (Q_{25}) untuk skenario kondisi saat ini sebesar 11.825,83 m³/s, dan untuk skenario rencana RTRW Provinsi Sulawesi Selatan sebesar 11.606,62 m³/s. Pemodelan hidrodinamika 2D mensimulasikan berbagai tinggi bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe terhadap luas genangan banjir. Kapasitas Danau Tempe yang optimal untuk mengurangi banjir tercapai dengan mempertahankan TMA pada elevasi +7,53 m dpl dengan tinggi bukaan pintu 4 m.

Kata kunci: *curve number*, Danau Tempe, bendung gerak, luas genangan

Abstract

Tempe Lake is a floodplain lake in South Sulawesi Province. The capacity of Tempe Lake is affected by the inflow into the lake. The high intensity of rain causes the lake water to overflow and flood the area around the lake. To reduce the flood inundation, an optimization study was carried out on the capacity of Tempe Lake. Optimization is carried out by adjusting the optimal height of the gate opening on the Tempe Moveable Weir using a hydrological model. The curve number (CN) of rivers flowing into the lake is used, which is a function of 2 land cover scenarios, namely the existing condition and the RTRW plan for South Sulawesi Province. Based on hydrological modeling, it was found that the inflow of Tempe Lake (Q_{25}) for the existing condition scenario was 11,825.83 m³/s, and for the RTRW plan of South Sulawesi Province, scenario was 11,606.62 m³/s. The 2D hydrodynamic modeling simulates various heights of gate openings on the Tempe Moveable Weir with respect to the flood inundation area. The optimal capacity of Tempe Lake to reduce flooding is achieved by maintaining the water level at +7.53 m above sea level with a gate opening height of 4 m.

Keywords: curve number, Tempe Lake, moveable weir, inundation area

1. Pendahuluan

Danau Tempe merupakan danau alami yang berada di Pulau Sulawesi. Danau Tempe memiliki luas sekitar 14.406 hektar sehingga menjadikan Danau Tempe sebagai danau terbesar kedua di Pulau Sulawesi dan terbesar kedelapan di Indonesia. Danau Tempe terletak di Provinsi Sulawesi Selatan, dikelilingi oleh tiga wilayah administrasi kabupaten yaitu Kabupaten Sidrap (2.896 ha), Kabupaten Soppeng (3.000 ha), dan Kabupaten Wajo (8.510 ha). Danau Tempe merupakan tipe danau paparan banjir dengan titik koordinat antara 3°39'–4°16' LS dan 119° 53'–120° 27' BT. Danau Tempe telah banyak dimanfaatkan guna memenuhi sumber air untuk kehidupan diantaranya oleh beberapa sektor pertanian, perikanan, pariwisata dan aktivitas masyarakat baik secara ekonomi maupun sehari – hari. Danau tempe adalah sebuah perairan yang memisahkan Pulau Sulawesi bagian selatan dan utara.

Terdapat 23 sungai yang mengalir dan bermuara di Danau Tempe yang membuat kapasitas Danau Tempe sangat dipengaruhi oleh *inflow* tersebut. Tingginya intensitas hujan dengan durasi lama meningkatkan debit yang masuk dan bermuara, sehingga kapasitas danau terlampaui menyebabkan air meluap ke daerah sekitar danau. Meluapnya air Danau Tempe dapat menimbulkan kerugian baik materi maupun non-materi terhadap manusia dan lingkungan sekitar danau. Banjir yang terjadi akibat luapan danau

Info Makalah:

Dikirim : 10-11-21;

Revisi 1 : 01-04-22;

Revisi 2 : 03-14-22;

Revisi 2 : 04-18-22;

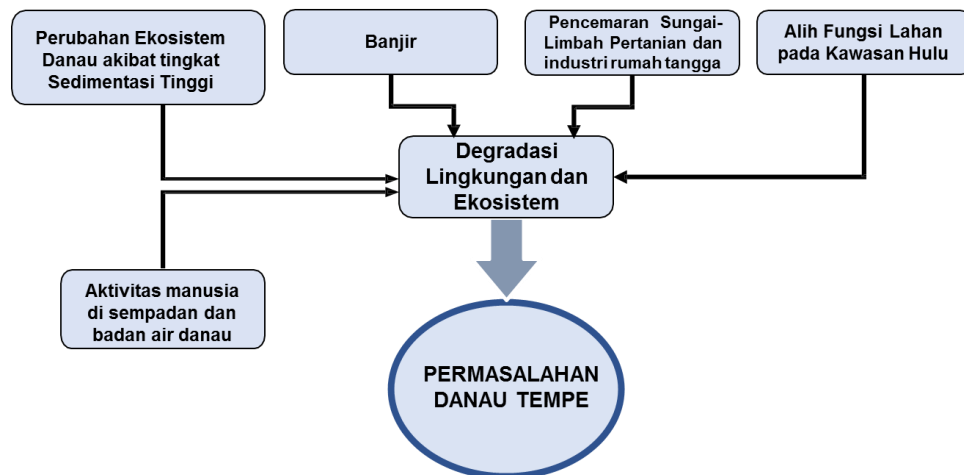
Diterima : 04-18-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 813-2122-5121

e-mail : roni.farfian@lecture.unjani.ac.id

tersebut membuat aktivitas terganggu. Dalam upaya untuk operasional pemanfaatan air dan upaya konservasi air danau, maka telah dibangun Bendung Gerak Tempe. Bendung Gerak Tempe berfungsi untuk mempertahankan elevasi permukaan air danau pada +5,00 m dpl dengan kedalaman air berkisar antara 2-3 m, sebagai muka air normal untuk pemanfaatan dan konservasi air. Selain itu Bendung Gerak Tempe juga berfungsi untuk mengatur elevasi permukaan air Sungai Cenranae agar kebutuhan air di daerah hilir dapat tetap terpenuhi. Berdasarkan uraian permasalahan yang ada di Danau Tempe, maka diperlukan kajian optimalisasi Danau Tempe untuk mendapatkan kapasitas ideal untuk mengurangi genangan banjir yang terjadi di sekitar Danau Tempe dengan mensimulasikan tinggi bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe menggunakan perangkat lunak *Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS). Adapun permasalahan Danau Tempe tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Permasalahan Danau Tempe

Lokasi penelitian terletak di tiga wilayah kabupaten yaitu Sidrap, Soppeng, dan Wajo, Provinsi Sulawesi Selatan. Adapun lokasi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

2. Metode

Secara garis besar penelitian ini dibagi menjadi menjadi 3 (tiga) tahap, yaitu analisis data, pemodelan hidrologi, dan pemodelan hidrodinamika 2D. Analisis data yang dilakukan pada penelitian ini yaitu penentuan batas Daerah Tangkapan Air (DTA), analisis tata guna lahan, dan analisis hidrologi. Hasil dari analisis data akan digunakan sebagai *input* dalam pemodelan hidrologi, dan pemodelan hidrodinamika 2D. Pemodelan hidrologi dilakukan untuk optimalisasi kapasitas danau dalam mengurangi genangan banjir, dengan mengatur tinggi bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe. *Output* pemodelan hidrologi berupa tinggi muka air di Danau Tempe untuk setiap tinggi bukaan pintu bendung gerak akan disimulasikan dalam pemodelan hidrodinamika 2D untuk memperkirakan genangan banjir yang terjadi, sehingga kapasitas Danau Tempe yang optimal dalam mengurangi banjir dapat ditentukan.

Daerah Aliran Sungai

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah daerah yang dibatasi oleh punggung – punggung gunung, bukit, pegunungan dimana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik (pos) yang ditinjau. Daerah aliran sungai ditentukan dengan menggunakan peta topografi yang dilengkapi garis – garis kontur (Bambang Triatmodjo, 2010).

Danau

Danau adalah wadah air dan ekosistemnya yang terbentuk secara alamiah termasuk situ dan wadah air sejenis dengan sebutan istilah lokal (Permen LH No. 28 Tahun 2009). Danau merupakan ekosistem air tawar yang berdasarkan aliran airnya termasuk ekosistem air tergenang. Danau dapat terbentuk melalui berbagai proses alam seperti gempa (tektonik), sesar, letusan gunung berapi (vulkanik), dataran banjir, *meander* (Hadisusanto, 2015), *karst gletser* maupun laguna. Danau Tempe merupakan salah satu danau bertipe paparan banjir (*flood plain*) yang berada di Kabupaten Wajo, Kabupaten Sidrap, dan Kabupaten Soppeng, Provinsi Sulawesi Selatan. Danau Tempe yang terbentuk dari depresi lempeng bumi Asia – Australia ini terletak di wilayah Sungai Walannae Cenranae pada ketinggian 10 mdpl dengan daerah tangkapan air seluas 4.587 km². Pada musim hujan, luas permukaan danau adalah 48.000 ha dan menggenangi areal persawahan, perkebunan, rumah penduduk, prasarana jalan dan jembatan, serta prasarana sosial lain yang menimbulkan kerugian yang cukup besar.

Rencana Tata Ruang Wilayah

Di Indonesia konsep perencanaan tata ruang mempunyai kaitan erat dengan konsep pengembangan wilayah suatu daerah. Tata ruang adalah wujud struktur ruang dan pola ruang (Andri Panjaitan dkk, 2019). Adapun tujuan khusus penataan ruang wilayah Provinsi Sulawesi Selatan adalah memulihkan daya dukung lingkungan, terutama DAS kritis sebagai dukungan proaktif terhadap fenomena perubahan iklim dunia, dengan menciptakan keseimbangan pemanfaatan ruang antara kawasan lindung dengan kawasan budidaya dalam satu ekosistem darat, laut, dan udara.

Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi adalah kumpulan keterangan atau fakta mengenai fenomena hidrologi (*hydrologic phenomena*), seperti besarnya curah hujan, debit sungai, tinggi muka air sungai, kecepatan aliran, dan konsentrasi sedimen sungai yang akan selalu berubah terhadap waktu (Soewarno, 1995). Adapun analisis hidrologi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Uji konsistensi data hujan.
2. Curah hujan wilayah
3. Analisis frekuensi
4. Uji kesesuaian distribusi frekuensi
5. Distribusi hujan tiap 1 jam
6. Intensitas curah hujan
7. Analisis debit banjir rencana menggunakan HEC-HMS (Novia R.R, 2016)

Metode SCS Curve Number

Metode SCS berusaha mengaitkan karakteristik DAS seperti tanah, tata guna lahan, dan vegetasi dengan bilangan kurva air larian CN (*runoff curve number*) yang menunjukkan potensi air larian untuk curah hujan tertentu. *Soil Conservation Service* (SCS) merupakan salah satu metode yang dapat dipergunakan untuk mengasumsikan rasio dari nilai limpasan permukaan langsung (*direct runoff*) dengan nilai potensial limpasan (*potential runoff*) (Chow, 1988). *Curve number* (CN) merupakan fungsi dari karakteristik DAS seperti tipe tanah, kelembapan tanah, tata guna lahan, tanaman penutup, dan cara pengerjaan tanah. Dasar dari metode ini adalah hubungan infiltrasi pada tiap jenis tanah dan curah hujan (Tyas D, 2016).

Uji Validasi

Validasi (*validation*) merupakan proses evaluasi terhadap model untuk mendapatkan gambaran tentang tingkat ketidakpastian yang dimiliki oleh suatu model dalam proses memprediksi hidrologi. Umumnya validasi dilakukan dengan menggunakan data diluar periode data yang digunakan untuk kalibrasi (Indarto 2012). Untuk melakukan uji validasi dilakukan dengan beberapa pengujian, antara lain:

1. *Root Mean Squared Error* (RSME)
Root Mean Squared Error (RSME) adalah metode untuk mengukur jumlah dengan estimator berbeda dari nilai benar banyaknya nilai yang diestimasi. RSME digunakan untuk menghitung tingkat *error* dari dua buah hasil percobaan model. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - Y)^2}{n}} \quad (1)$$

2. *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Uji efisiensi *Nash-Sutcliffe* dilakukan untuk menguji tingkat kesahihan model berdasarkan kriteria berikut:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X - Y)^2}{\sum_{i=1}^n (X - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Tabel 1. Kriteria Nilai NSE

Nilai	Interpretasi
$0,60 < NSE \leq 1,00$	Sangat Baik
$0,40 < NSE \leq 0,60$	Baik
$0,20 < NSE \leq 0,40$	Memenuhi
$NSE \leq 0,20$	Tidak Memenuhi

Tabel 2. Kriteria Nilai Persen *Difference*

Performance Rating	PBIAS
Sangat Baik	$PBIAS \leq \pm 15\%$
Baik	$\pm 15\% \leq PBIAS < \pm 20\%$
Memenuhi	$\pm 20\% \leq PBIAS < \pm 30\%$
Tidak Memenuhi	$PBIAS \geq \pm 30\%$

Perangkat Lunak HEC-RAS

HEC-RAS merupakan perangkat lunak untuk mensimulasikan aliran sungai, *River Analysis System* (RAS), yang dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC), di bawah *US Army Corps of Engineers* (USACE). HEC-RAS dapat digunakan untuk menganalisis 1D maupun 2D (Istianto, 2014). Model hidrodinamika HEC-RAS 5.0 yang dikembangkan dapat digunakan untuk simulasi genangan banjir aliran dinamik 2D (Brunner, 2016). HEC-RAS yang akan digunakan untuk analisis pada kajian ini adalah HEC-RAS versi 6.0.0 yang baru dirilis. HEC-RAS pada kajian ini digunakan untuk memodelkan dampak genangan dari model hidrologi yang telah dilakukan oleh perangkat lunak HEC-HMS sebelumnya.

3. Hasil dan Pembahasan

Penentuan Batas Daerah Tangkapan Air

Penentuan batas Daerah Tangkapan Air (DTA) Danau Tempe dilakukan berdasarkan pada peta DEMNAS dengan bantuan perangkat lunak Arc-GIS. Dalam penelitian ini terdapat 13 sub-DTA yang akan ditinjau, nama sub-DTA beserta luasnya ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

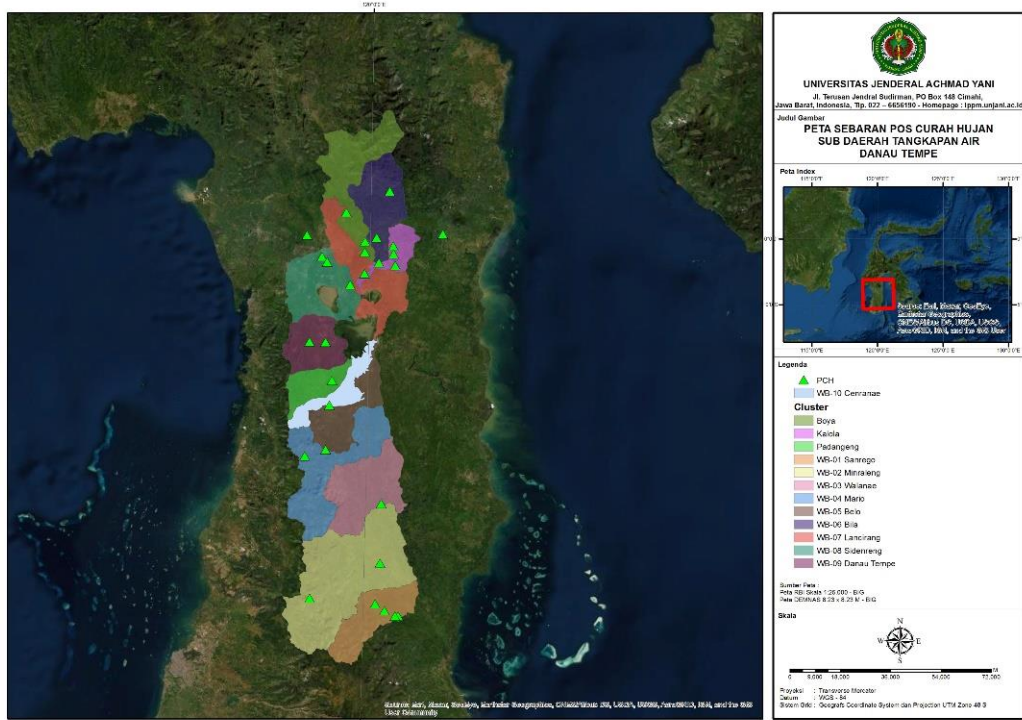
Tabel 3. Luas Sub-DTA Danau Tempe

No	Sub-DTA	Luas	
		Ha	Km ²
1	Boya	55692,40	556,92
2	Kalola	16288,17	162,88
3	Padangeng	20981,53	209,82
4	Sanrego	39305,62	393,06
5	Minraleng	123155,24	1231,55
6	Walanae	55664,35	556,64
7	Mario	65768,54	657,69
8	Belo	33682,88	336,83
9	Bila	44211,77	442,12
10	Lancirang	45545,66	455,46
11	Sidenreng	43923,90	439,24
12	CA-Danau Tempe	33497,18	334,97
13	Cenranae	20379,36	203,79

Data Pos Curah Hujan

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang memiliki ketelitian tinggi, dibutuhkan data yang memadai baik kualitas maupun kuantitas. Data curah hujan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data pengukuran selama 17 tahun pada pos curah hujan terdekat.

Data curah hujan harian maksimum berdasarkan ketersediaan data, semua data hujan digunakan untuk analisis hidrologi pada kajian ini. Data curah hujan harian maksimum didapatkan dari dokumen Detail Desain Revitalisasi Danau Tempe: 2018 (BBWS Pompengan – Jeneberang).

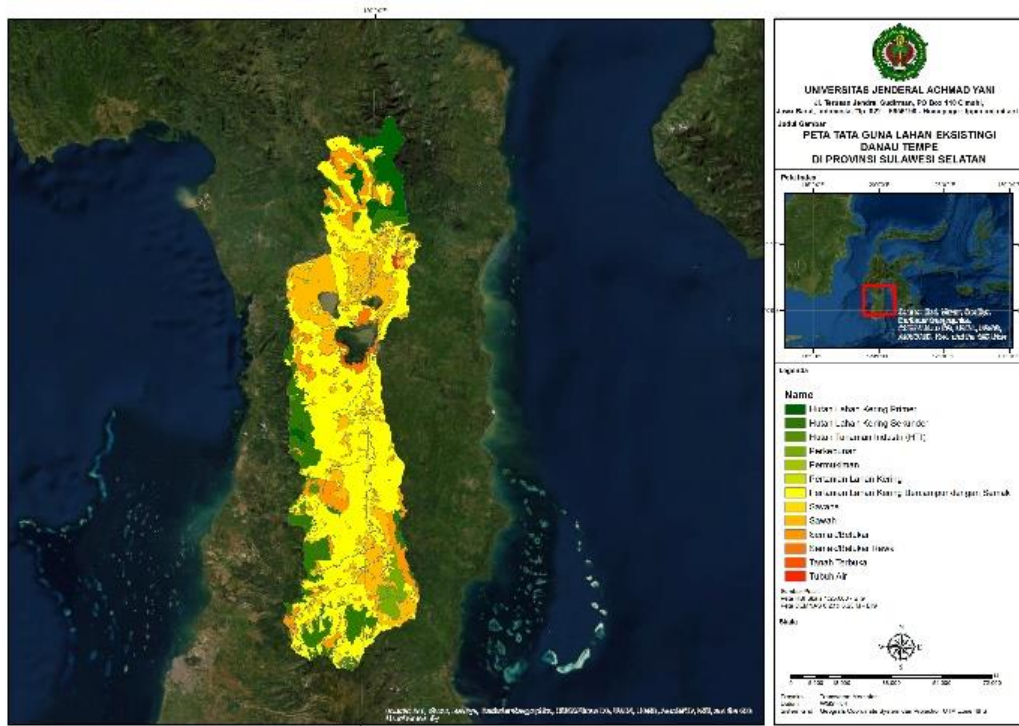


Gambar 3. Peta Pos Curah Hujan

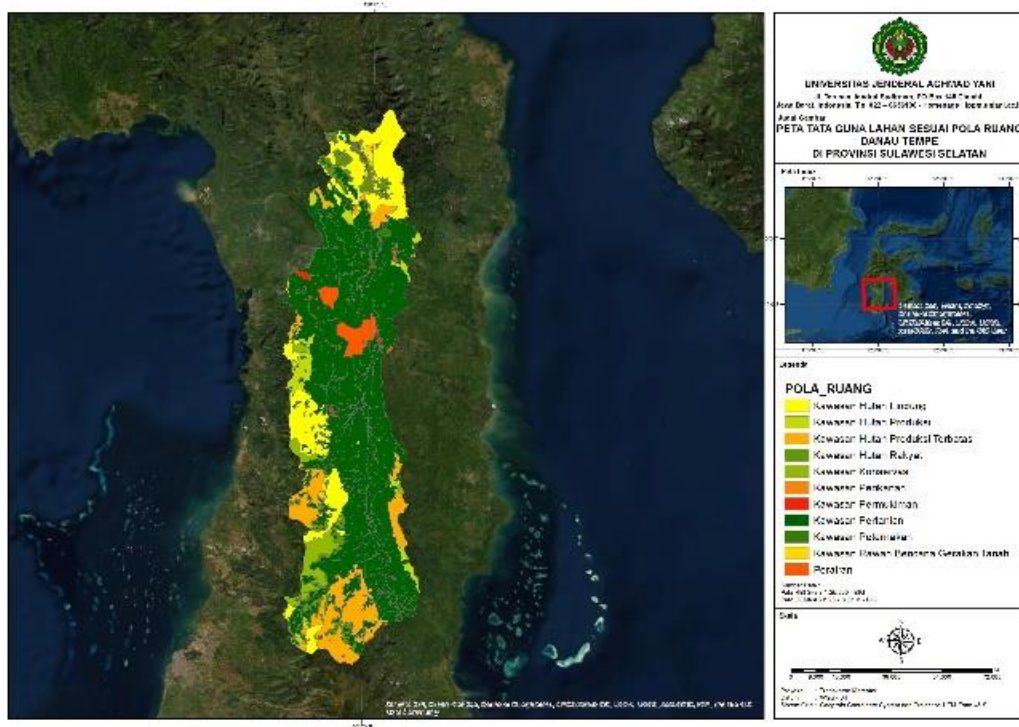
Analisis Tata Guna Lahan

Perubahan kondisi suatu kawasan yang tadinya merupakan daerah resapan, menjadi daerah terbangun yang mengakibatkan hujan yang jatuh ke lahan tidak dapat kembali ke tanah. Tata guna lahan pada suatu DAS dan sub-DTA baik untuk pemukiman, pertanian, tambak dan lain sebagainya akan berpengaruh pada nilai *curve number*. Nilai tersebut akan digunakan sebagai parameter *basin* pada permodelan hidrologi menggunakan HEC-HMS. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan tata guna lahan pada kawasan masing – masing Sub-DTA dalam kondisi saat ini (skenario 1) dan sesuai RTRW Provinsi Sulawesi Selatan (skenario 2).

Kajian Optimalisasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan



Gambar 4. Peta Tata Guna Lahan Skenario 1



Gambar 5. Peta Tata Guna Lahan Skenario 2

Analisis Hidrologi

Dalam hasil analisis hidrologi untuk pengujian *outlier* data curah hujan dan uji konsistensi massa ganda untuk semua sub-DTA terpenuhi. Adapun pada analisis *frekuensi* dilakukan menggunakan metode Gumbel, Normal, dan *Log Pearson Type III* yang kemudian dilakukan uji kecocokan pada masing – masing metode sehingga didapatkan rencana pada setiap periode ulang.

Tabel 4. Rekapitulasi Analisis Frekuensi Metode Gumbel Untuk Setiap Sub-DTA

TR	Rekapitulasi Analisis Hidrologi Metode Gumbel											
	Curah Hujan Harian Maksimum Periode Ulang pada Sub – DAS (cm)											
	Boya	Kalola	Padangeng	Sanrego	Minraleng	Walanae	Mario	Belo	Bila	Lancirang	Sidenreng	D.Tempe
02	129	92	106	110	110	98	115	111	132	124	154	90
05	162	117	133	139	133	120	176	133	178	145	206	135
10	184	133	151	158	148	135	217	148	209	159	239	164
25	212	154	173	183	167	154	268	167	248	176	282	201
50	233	169	190	201	182	168	306	181	277	189	314	228
100	253	184	206	219	196	181	343	195	306	202	346	255

Selanjutnya dilakukan analisis distribusi hujan interval per jam menggunakan metode ABM (*Alternating Block Method*). Berikut dapat dilihat pada Tabel 5, dan Tabel 6, untuk rekapitulasi distribusi hujan interval per jam dengan periode ulang hujan rencana 25 dan 50 tahun.

Tabel 5. Rekapitulasi Distribusi Hujan Interval 1 Jam untuk Periode Ulang 25 Tahun

Jam	Curah Hujan Interval 1 Jam pada sub-DTA (cm)											
	Belo	Bila	Boya	D.Tempe	Kalola	Lancirang	Mario	Minraleng	Padangeng	Sanrego	Sidenreng	Walanae
1	11	17	14	14	10	12	18	11	12	12	19	10
2	17	25	21	20	15	18	27	17	17	18	28	15
3	92	137	117	110	85	97	147	92	95	101	155	85
4	24	36	30	29	22	25	38	24	25	26	40	22
5	13	20	17	16	12	14	21	13	14	15	23	12
6	10	15	13	12	9	10	16	10	10	11	17	9
Jumlah	167	248	212	201	154	176	268	167	173	183	282	154

Tabel 6. Rekapitulasi Distribusi Hujan Interval 1 Jam untuk Periode Ulang 50 Tahun

Jam	Curah Hujan Interval 1 Jam pada sub-DTA (cm)											
	Belo	Bila	Boya	D.Tempe	Kalola	Lancirang	Mario	Minraleng	Padangeng	Sanrego	Sidenreng	Walanae
1	12	19	16	15	11	13	21	12	13	14	21	11
2	18	28	23	23	17	19	31	18	19	20	32	17
3	100	153	128	125	93	104	168	100	104	111	173	92
4	26	40	33	33	24	27	44	26	27	29	45	24
5	14	22	19	18	13	15	24	15	15	16	25	13
6	11	16	14	13	10	11	18	11	11	12	19	10
Jumlah	181	277	233	228	169	189	306	182	190	201	314	168

Setelah dilakukan analisis distribusi hujan interval per jam menggunakan metode ABM lalu dilakukan pemodelan menggunakan HEC-HMS untuk mendapatkan hasil simulasi debit banjir rencana pada masing-masing sub-DTA yang menjadi *inflow* pada Danau Tempe.

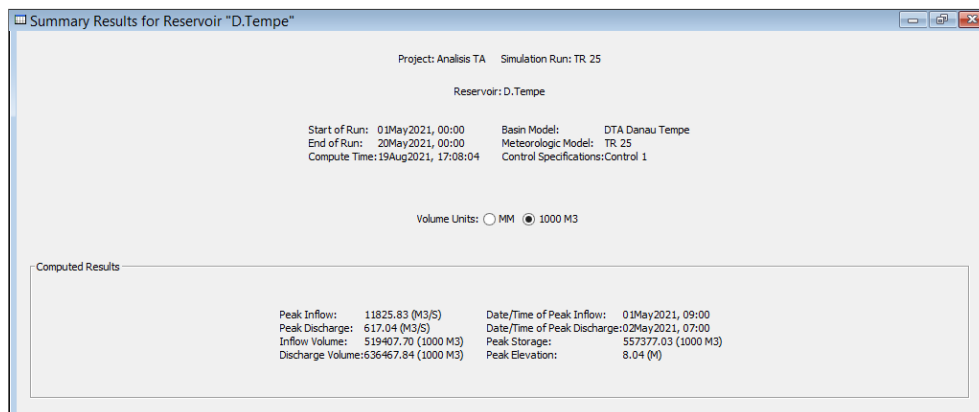
Pemodelan HEC-HMS

Perhitungan debit banjir rencana dibantu dengan perangkat lunak *HEC-HMS* dan menggunakan metode *HSS Snyder* untuk *transform* dan metode *SCS Curve Number* untuk *losses*. Model *HEC-HMS* dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya debit banjir rencana yang masuk ke Danau Tempe. Model *HEC-HMS* dapat mensimulasikan puncak aliran harian untuk mendapatkan debit banjir rencana dari sub-DTA yang ditinjau. Adapun tahapan input pada *HEC-HMS* adalah sebagai berikut:

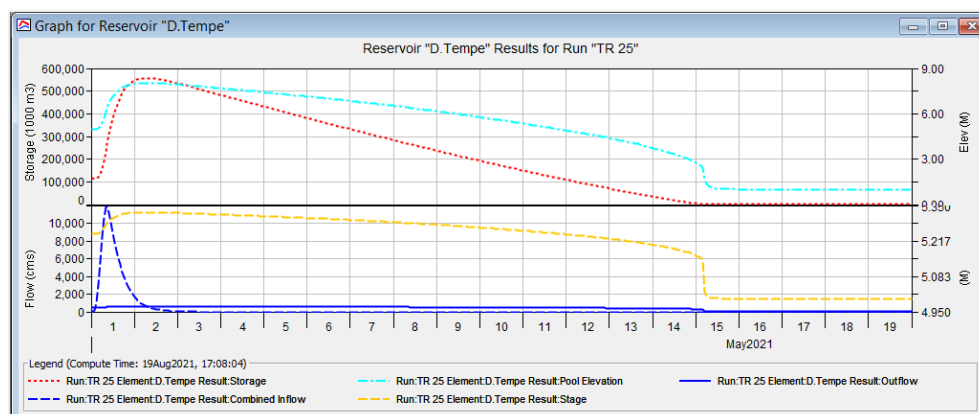
1. *Basin Model* (Model Daerah Aliran Sungai / Daerah Tangkapan Air).
2. Data Parameter sub-DTA.
3. Input Parameter sub-DTA yaitu *Sub-basin*, *Loss Method*, dan *Transform Method*.
4. Input *Meteorologic Model Manager*.
5. Input Tabel *Precipitation*.
6. Input *Reservoir*.
7. Input *Paired Data Manager*.
8. Input *Control Specification*.
9. Input *Create Compute*.

Hasil Pemodelan HEC-HMS

Pemodelan HEC-HMS yang dilakukan pada tahap awal mendapatkan hasil debit banjir berdasarkan periode ulang 25 tahun, dengan bukaan pintu Bendung Gerak Tempe sebesar 1 meter yaitu hasil *inflow* yang masuk ke Danau Tempe sebesar 519407,70 (1000 m³), dan Tinggi Muka Air (TMA) Danau Tempe berada pada elevasi 8,04 meter. Pada Titik Tinjau Bendung Gerak Tempe hasil *running* menunjukkan hasil perbedaan data hasil observasi dengan hasil *running*. Hal ini dapat terlihat pada perbedaan *percent* bias sebesar 49,17% dan *Nash-Sutcliffe* sebesar 0,371 yang mana untuk *percent* bias jika diatas 30% performa untuk evaluasi kalibrasi data debit termasuk ke dalam katagori tidak baik. Maka selanjutnya dilakukan optimasi agar hasil model dapat memberikan nilai yang mendekati kondisi lapangan.



Gambar 6. Rekapitulasi Hasil Model pada Titik Tinjau Danau Tempe Periode Ulang 25 Tahun



Gambar 7. Hasil Debit Banjir Periode Ulang 25 Tahun pada Titik Tinjau Danau Tempe

Kalibrasi Data

Uji validasi data dilakukan guna memberikan hasil model agar mendekati keadaan yang sebenarnya di lapangan dengan cara mengoptimasi parameter pada input HEC-HMS yaitu *initial abstraction* menggunakan *tools* yang tersedia pada perangkat lunak HEC-HMS. Validasi data dilakukan dengan membandingkan data hasil *running* dengan data observasi pada Bendung Gerak Tempe. Kalibrasi data dilakukan dengan menggunakan bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe yaitu bukaan 4 meter sesuai dengan data observasi yang ada. Adapun hasil rekapitulasi nilai *initial abstraction* pada setiap Sub-DTA yang didapatkan setelah dioptimalisasi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai *Initial Abstraction* Setelah Dioptimasi

Sub-DTA	<i>Initial Value</i>	Optimasi
	<i>Initial Abstraction</i>	<i>Initial Abstraction</i>
Mario	17,33	11,613
Minraleng	29,48	26,246
Sanrego	18,86	3,932
Walanae	13,14	0,75255
Belo	13,36	0,79625
Lancirang	15,65	23,664
Bila	21,91	11,222
Boya	19	4
Kalola	14,04	25,862
Sidenreng	17,28	38,634
subDTA-Danau Tempe	15,23	52,646
Padangeng	17,1	88,416
Cenranae	12,79	94,685
Parameter	<i>Percent Bias</i>	29,50%
	<i>Nash-Sutcliffe</i>	0,262

Berdasarkan uji validasi data yang dilakukan menggunakan metode uji *statistic* RMSE (*Root Mean Square Error*) menggunakan *tools* optimasi pada HEC-HMS yaitu didapatkan nilai *percent bias* sebesar 29,50% dan nilai *Nash-Sutcliffe* 0,262 yang dapat dikategorikan memenuhi. Nilai *initial abstraction* sesuai optimasi akan digunakan kembali saat *running* pada masing – masing periode ulang, jenis tutupan lahan berdasarkan skenario 1 dan skenario 2, serta berbagai tinggi bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe.

Hasil *Running* Skenario 1

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan HEC-HMS debit puncak yang masuk ke Danau Tempe pada skenario tutupan lahan sesuai kondisi saat ini (skenario 1) didapatkan sebesar 11.825,83 m³/s. Adapun tinggi muka air Danau Tempe pada skenario 1 dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Tinggi Muka Air Danau Tempe pada Skenario 1 Berdasarkan Tinggi Bukaan Pintu

Tinggi Bukaan Pintu (m)	Tinggi Muka Air Danau Tempe berdasarkan Periode Ulang (m)					
	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1	6,93	7,52	7,88	8,12	8,62	8,90
2	6,62	7,23	7,61	7,86	8,36	8,65
3	6,34	6,98	7,36	7,62	8,14	8,43
4	6,30	6,89	7,26	7,53	8,03	8,31
5	6,20	6,79	7,25	7,48	7,95	8,22

Hasil *Running* Skenario 2

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan HEC-HMS debit puncak yang masuk ke Danau Tempe dengan kondisi tutupan lahan sesuai RTRW Provinsi Sulawesi Selatan (skenario 2) didapatkan sebesar 11.606,62 m³/s. Adapun tinggi muka air Danau Tempe pada skenario 2 dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Tinggi Muka Air Danau Tempe Skenario 2 Berdasarkan Tinggi Bukaan Pintu

Tinggi Bukaan Pintu (m)	Tinggi Muka Air Danau Tempe berdasarkan Periode Ulang (m)					
	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1	6,80	7,39	7,75	8,00	8,50	8,77
2	6,50	7,10	7,48	7,73	8,24	8,53
3	6,20	6,84	7,22	7,50	8,01	8,30
4	6,19	6,76	7,13	7,40	7,90	8,18
5	6,09	6,60	6,91	7,37	7,82	8,10

Kesimpulan Hasil Pemodelan HEC-HMS

Berdasarkan hasil pemodelan yang dilakukan dengan HEC-HMS didapatkan perbedaan hasil antara skenario 1 (tutupan lahan sesuai kondisi saat ini) dan skenario 2 (tutupan lahan sesuai RTRW Provinsi Sulawesi Selatan). Dapat dilihat perbedaan yang secara signifikan yaitu perbedaan debit puncak yang relatif lebih besar pada skenario 1 dibandingkan dengan skenario 2. Selain itu, TMA pada skenario 2 lebih rendah dibandingkan dengan TMA pada skenario 1 untuk setiap periode ulang debit banjir dan masing – masing tinggi bukaan pintu.

Optimalisasi Operasi Bendung Gerak

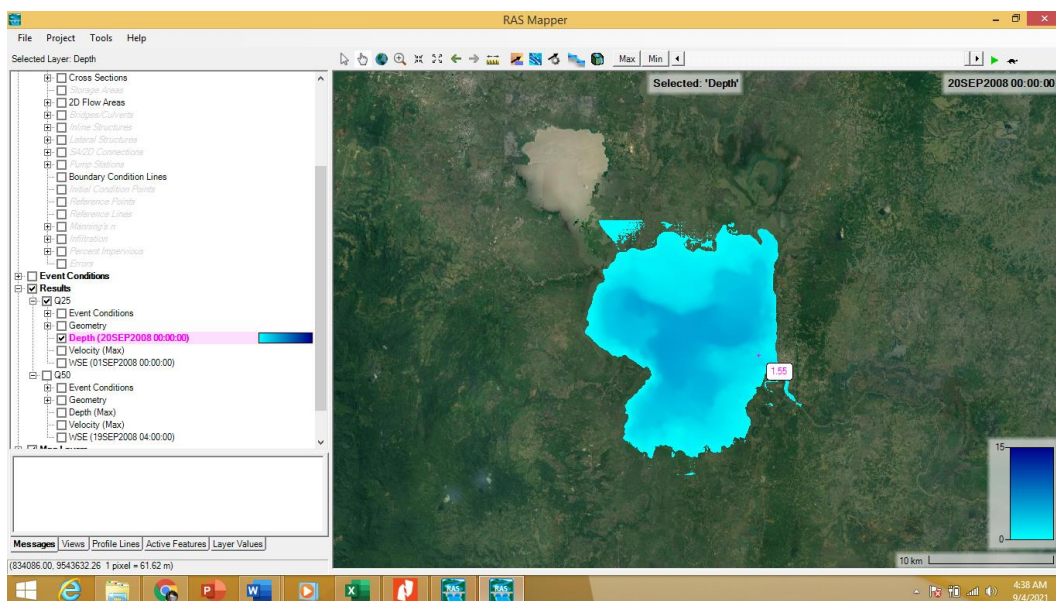
Optimalisasi operasi Bendung Gerak Tempe dilakukan dengan cara mensimulasikan beberapa alternatif tinggi bukaan pintu pada bendung gerak. Proses simulasi yang dilakukan merupakan alternatif tinggi bukaan pintu pada bendung gerak yang dilakukan pada pemodelan HEC-HMS. Terdapat beberapa alternatif elevasi bukaan pintu yang memiliki dampak kaitan terhadap tinggi muka air pada Danau Tempe. Semakin tinggi bukaan pintu pada bendung gerak akan mengakibatkan tinggi muka air pada danau semakin turun, yang mana hal itu sangat berpengaruh terhadap genangan yang terjadi di sekitar Danau Tempe. Adapun hasil optimalisasi tinggi muka air pada Bendung Gerak Tempe untuk setiap tinggi bukaan pintu dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Optimalisasi Tinggi Muka Air pada Bendung Gerak Tempe Berdasarkan Tinggi bukaan Pintu

Tinggi Bukaan Pintu (m)	Tinggi Muka Air pada Bendung Gerak Tempe (m)					
	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1	6,93	7,52	7,88	8,12	8,62	8,90
2	6,62	7,23	7,61	7,86	8,36	8,65
3	6,34	6,98	7,36	7,62	8,14	8,43
4	6,30	6,89	7,26	7,53	8,03	8,31
5	6,20	6,79	7,25	7,48	7,95	8,22

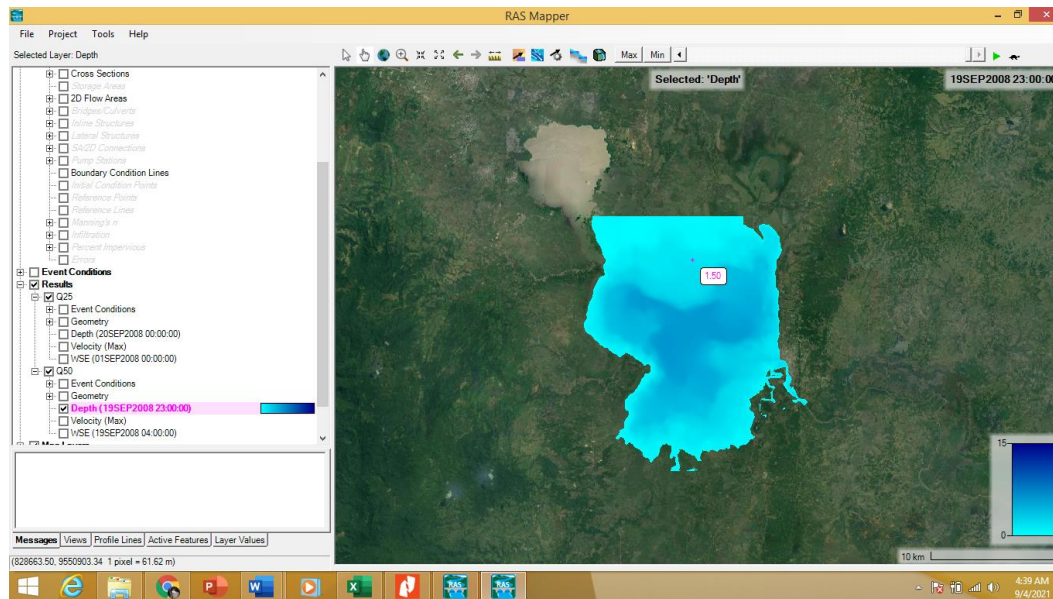
Pemodelan Hidrodinamika 2D

Pemodelan hidrodinamika 2D dilakukan dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS. Hasil pemodelan hidrodinamika 2D berupa luas genangan banjir di sekitar Danau Tempe untuk TMA debit banjir periode ulang 25 tahun (Q_{25}) dan periode ulang 50 tahun (Q_{50}) yang dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Luas Genangan untuk TMA Q_{25}

Kajian Optimasi Kapasitas Danau Tempe untuk Mengurangi Banjir di Kabupaten Sidrap, Kabupaten Soppeng, dan Kabupaten Wajo - Provinsi Sulawesi Selatan



Gambar 9. Luas Genangan untuk TMA Q₅₀

Analisis Luas Genangan Banjir

Berdasarkan permodelan yang dilakukan menggunakan HEC-HMS dan HEC-RAS didapatkan tinggi muka air pada Danau Tempe sehingga akan dapat mempengaruhi luas genangan banjir di sekitar Danau Tempe. Adapun luas daerah tergenang yang terdampak dari luapan danau dilakukan analisis berbasis spasial analisis menggunakan perangkat lunak Arc-GIS. Analisis luas daerah tergenang ditinjau berdasarkan debit banjir Q₂₅ dan Q₅₀ untuk setiap tinggi bukaan pintu.

Tabel 11. Rekapitulasi Luas Daerah Tergenang Q₂₅ untuk Setiap Tinggi Bukaan Pintu

Kabupaten	Luas Daerah Tergenang untuk Setiap Tinggi Bukaan Pintu (Ha)				
	1 Meter	2 Meter	3 Meter	4 Meter	5 Meter
Wajo	8321,5	6128,7	5429,6	5143,2	4931,9
Sidrap	362,8	295,8	228,2	195,9	169,3
Soppeng	1173,7	899,0	718,5	651,0	591,4
Total	9857,9	7323,5	6376,3	5990,1	5692,6

Tabel 12. Rekapitulasi Luas Daerah Tergenang Q₅₀ untuk Setiap Tinggi Bukaan Pintu

Kabupaten	Luas Daerah Tergenang untuk Setiap Tinggi Bukaan Pintu (Ha)				
	1 Meter	2 Meter	3 Meter	4 Meter	5 Meter
Wajo	9661,233	9198,184	8463,55	7507,089	6478,821
Sidrap	684,505	441,6342	366,1661	344,4191	319,1312
Soppeng	1546,261	1304,081	1183,43	1111,568	985,6751
Total	11892	10943,9	10013,15	8963,076	7783,627

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini, dapat disimpulkan hal-hal sebagian berikut:

1. *Inflow* yang masuk ke Danau Tempe berdasarkan hasil pemodelan menggunakan HEC-HMS dengan kedua skenario tutupan lahan yaitu sesuai kondisi saat ini didapatkan debit puncak sebesar 11.825,83 m³/s dan kondisi sesuai RTRW Provinsi Sulawesi Selatan sebesar 11.606,62 m³/s;
2. Luas genangan yang terjadi berdasarkan hasil analisis spasial dengan debit banjir Q₂₅ didapatkan luasan total terbesar daerah tergenang sebesar 9857,9 ha dan terkecil sebesar 5692,6 ha. Sedangkan hasil analisis spasial luas daerah tergenang dengan debit banjir Q₅₀ didapatkan luasan total terbesar daerah tergenang sebesar 11892 ha dan terkecil sebesar 7783,62 ha;
3. Semakin besar tinggi bukaan pintu pada Bendung Gerak Tempe akan mengakibatkan penurunan volume pada Danau Tempe dikarenakan meningkatnya *outflow* yang keluar melalui bendung gerak. Maka semakin besar tinggi bukaan pintu dapat mereduksi luas genangan yang terjadi di sekitar danau.

4. Kapasitas Danau Tempe yang optimal untuk mengurangi genangan banjir yang terjadi yaitu dengan mempertahankan Tinggi Muka Air (TMA) pada elevasi +7,53 m dengan membuka tinggi bukaan pintu Bendung Gerak Tempe 4 m.

Daftar Notasi

- n = Koefisien *manning*
 Q_{25} = Debit aliran periode ulang 25 tahun
 Q_{50} = Debit aliran periode ulang 50 tahun
 R = Intensitas hujan selama t jam
 R_{24} = Curah hujan maksimum dalam 24 jam

Daftar Pustaka

- Anonim, 2008, "HEC-RAS River Analysis System : User's Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre. ASCE", Hydrology Handbook, ASCE, USA. 1986
- Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pompengan – Jeneberang., 2018, Dokumen Detail Desain Revitalisasi Danau Tempe.
- Brunner, G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System. 2D Modeling User's Manual. US Army Corps of Engineers, USA.
- Daru, T., Andawayanti, U., & Limantara, L. M. (2016). Analisis Perubahan bilangan kurva aliran permukaan (runoff curve number) terhadap debit banjir pada DAS Brantas Hulu. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 7(1), 150-159.
- Hadisusanto, S., 2015. Kontribusi Biologi dalam Pengelolaan dan Pengembangan Danau di Indonesia. In Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar. Yogyakarta: Universitas Gajahmada.
- Hajibayov, F., Ozkul, B. D. dan Terzi, F. (2017) 'Floodplain Modeling and Mapping Using The Geographical Information Systems (GIS) and HecRAS/Hec-GeoRAS Applications. Case of Edirne, Turkey.', in *GISRUK 2017*. Manchester, UK.
- Indarto. (2012). Hidrologi – Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi. Jakarta : Bumi Aksara.
- Istiarto. 2014. Modul Pelatihan Simulasi Aliran 1-Dimensi Dengan Bantuan Paket Program Hidrodinamika HEC-RAS. Universitas Gadjah Mada
- Panjaitan, A., Sudarsono, B., & Bashit, N. (2019). Analisis Kesesuaian Penggunaan Lahan Terhadap Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Di Kabupaten Cianjur Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 248-257.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup. 2009. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 28 tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau Dan/Atau Waduk.
- Quiroga, V. M., Kure, S., Udo, K. dan Mano, A. (2016) 'Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5', *RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agu. IAHR y WCCE*, 3(1), pp. 25–33. doi: 10.1016/j.riba.2015.12.001.
- Rahman, M. M. dan Ali, M. M. (2016) 'Flood Inundation Mapping of Floodplain of the Jamuna River Using HECRAS and HEC-GeoRAS', *Journal of PU*, 3(2), pp. 24–32.
- Rante, N. R., Sumarauw, J. S., & Wuisan, E. M. (2016). Analisis Debit Banjir Anak Sungai Tikala Pada Titik Tinjauan Kelurahan Banjer Link. V Kecamatan Tikala Dengan Menggunakan HEC-HMS Dan HEC-RAS. *TEKNO*, 14(65).
- SNI 2415:2016. (2016). Tata cara perhitungan debit banjir rencana. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Soewarno. 1995. Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisa Data. Bandung: Nova
- Triatmodjo, B. (2010). *Hidrologi terapan*. Beta Offset.

Dehidrasi Etanol Menggunakan Zeolit Teraktivasi Irradiasi Lampu Sinar Ultraviolet (*UV Light*) pada Kolom *Fixed Bed*

M. Praditia Anzor¹, Simparmin Br. Ginting¹, Muhammad Haviz¹, dan Darmansyah¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

praditia25anshor@gmail.com, Simparmin@gmail.com, muhammadhaviz@eng.unila.ac.id,

Darmansyah82@gmail.com

Abstrak

Untuk mendapatkan kemurnian etanol >99,5% diperlukan metode adsorpsi menggunakan Zeolit Alam Lampung (ZAL). Agar dapat digunakan sebagai adsorben zeolit harus dilakukan aktivasi dengan menggunakan irradiasi lampu sinar ultraviolet *germicidal lamp* 254 nm, *black light lamp* 360 nm dan *insect lamp* 546 nm. Hasil uji karakteristik BET didapatkan luas permukaan zeolit non-treatment 41,331 m²/g, *germicidal lamp* 41,158 m²/g, *black light lamp* 40,399 m²/g dan *insect lamp* 38,796 m²/g. Total volume pori terbesar didapat dari zeolit aktivasi sinar uv *germicidal lamp* 0,0690 cc/gram dan ukuran rata-rata pori terdapat pada zeolit aktivasi *insect lamp* 35,57 Å. Setelah diaktivasi zeolit dibentuk pellet menggunakan binder dari tepung terigu dengan komposisi 35% berat zeolit, kemudian zeolit di kalsinasi untuk menghilangkan binder yang masih melekat dan membuka pori yang tertutup binder. Hasil yang diperoleh di dehidrasi etanol untuk meningkatkan kemurnian dengan menggunakan zeolit yang teraktivasi sinar uv *germicidal lamp* 98,69% v/v selama 45 menit, *black light* dan *insect lamp* 98,69% v/v selama 55 menit.

Kata kunci: Zeolit Alam Lampung (ZAL), Aktivasi, UV, Karakteristik, Adsorpsi

Abstract

To obtain ethanol purity >99.5%, an adsorption method using Lampung Natural Zeolite (ZAL) is needed. In order to be used as a zeolite adsorbent, activation must be carried out using UV light lamp irradiation *germicidal lamp* 254 nm, *blacklight lamp* 360 nm and *insect lamp* 546 nm. The results of the BET characteristic test showed that the surface area of the non-treated zeolite was 41,331 m²/g, the *germicidal lamp* was 41,158 m²/g, the *black light lamp* was 40,399 m²/g and the *insect lamp* was 38,796 m²/g. The largest total pore volume was obtained from UV *germicidal lamp* activated zeolite 0.0690 cc/gram and the average pore size was found in *insect lamp* activated zeolite 35.57. After the activation of the zeolite, pellets were formed using a binder from wheat flour with a composition of 35% by weight of zeolite, then the zeolite was calcined to remove the binder that was still attached and opened the pores that were closed by the binder. The results obtained were dehydrated ethanol to increase purity using zeolite activated by UV *germicidal lamp* 98.69% v/v for 45 minutes, *blacklight* and *insect lamp* 98.69% v/v for 55 minutes.

Keywords: Lampung Natural Zeolite (ZAL), Activation, UV, Characteristic, Adsorption.

1. Pendahuluan

Di masa yang akan datang kebutuhan akan energi semakin besar, terutama energi bahan bakar terbarukan sebagai pengganti bahan bakar minyak (BBM) yang ada saat ini. Salah satu bahan bakar pengantinya ialah etanol. Dalam penggunaannya sebagai pengganti bahan bakar, etanol yang dapat digunakan mempunyai spesifikasi tertentu berupa kadar kemurniannya >99,5% (*fuel grade*), kenyataannya etanol yang banyak diproduksi dan dipasarkan saat ini mempunyai kemurnian sebesar 95-96% (Handrian, dkk, 2017).

Menurut Nurdyastuti, 2005 untuk meningkatkan kemurniannya dapat dilakukan melalui proses adsorpsi (dehidrasi). Proses adsorpsi dapat dilakukan menggunakan zeolit sebagai *molecular sieve adsorben*. Agar dapat dijadikan sebagai adsorben, zeolit perlu dilakukan aktivasi dalam upaya meningkatkan luas permukaannya agar permukaan kontak adsorpsi menjadi lebih luas. Memperbesar luas permukaan zeolit, volume pori serta mengetahui karakteristik lainnya, dapat dilakukan dengan ada beberapa metode yang biasa digunakan yaitu dengan cara fisika dan kimia. Cara fisika yang umum digunakan adalah dengan kalsinasi (pemanasan) pada suhu 450 °C – 500 °C, dan secara kimia menggunakan zat kimia seperti HCl, H₂SO₄, KCl, HCN dsb. (Slamet, dkk 2018)

Dalam penelitian ini zeolit yang digunakan adalah Zeolit Alam Lampung (ZAL) yang diaktivasi dengan menggunakan proses fisika berupa proses irradiasi lampu sinar ultraviolet (Sinar UV). Pada dasarnya irradiasi lampu sinar uv mampu memperbesar luas permukaan suatu benda padat, Irradiasi tersebut memancarkan sinar yang

Info Makalah:

Dikirim : 03-04-22;

Revisi 1 : 03-31-22;

Revisi 2 : 04-18-22;

Diterima : 04-19-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-813-7393-4522

e-mail : praditia25anshor@gmail.com

mempunyai panjang gelombang 254 sampai 546 nm. Gelombang elektromagnetik tersebut mampu menembus pori-pori (irradiasi) permukaan suatu benda padat yang akan mengenai elektron-elektron bebas atau pengotor pada benda tersebut, sehingga elektron-elektron bebas atau pengotor tersebut dapat terlepas dari struktur utamanya dan menghasilkan karakteristik yang baru. (Setyawan, dkk. 2017; Deepak, dkk. 2009).

Proses ini bertujuan untuk memperbesar luas permukaan, volume pori dan mengetahui karakteristik lainnya. Diharapkan zeolit mempunyai karakteristik baru yang efektif berfungsi sebagai *adsorben* dalam menyerap air pada larutan etanol untuk mencapai kemurnian yang diinginkan sebagai standar *fuel grade*.

2. Metode

Berikut merupakan bahan dan alat serta metode yang digunakan dalam penelitian ini :

2.1 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah etanol 96 % v/v, Zeolit Alam Lampung (ZAL) 200 mesh, aquades, tepung terigu. Bahan baku Zeolit Alam Lampung diperoleh dari CV. Mina Tama Bandar Lampung. Adapun alat penelitian yang digunakan antara lain lampu sinar ultraviolet, kotak aktivator, kolom adsorber, gelas beaker, neraca analitik, desikator, pompa peristaltik, labu leher tiga, alumunium foil, cawan silika, mortar dan alung, *screening* 200 mesh, oven, dan furnace.

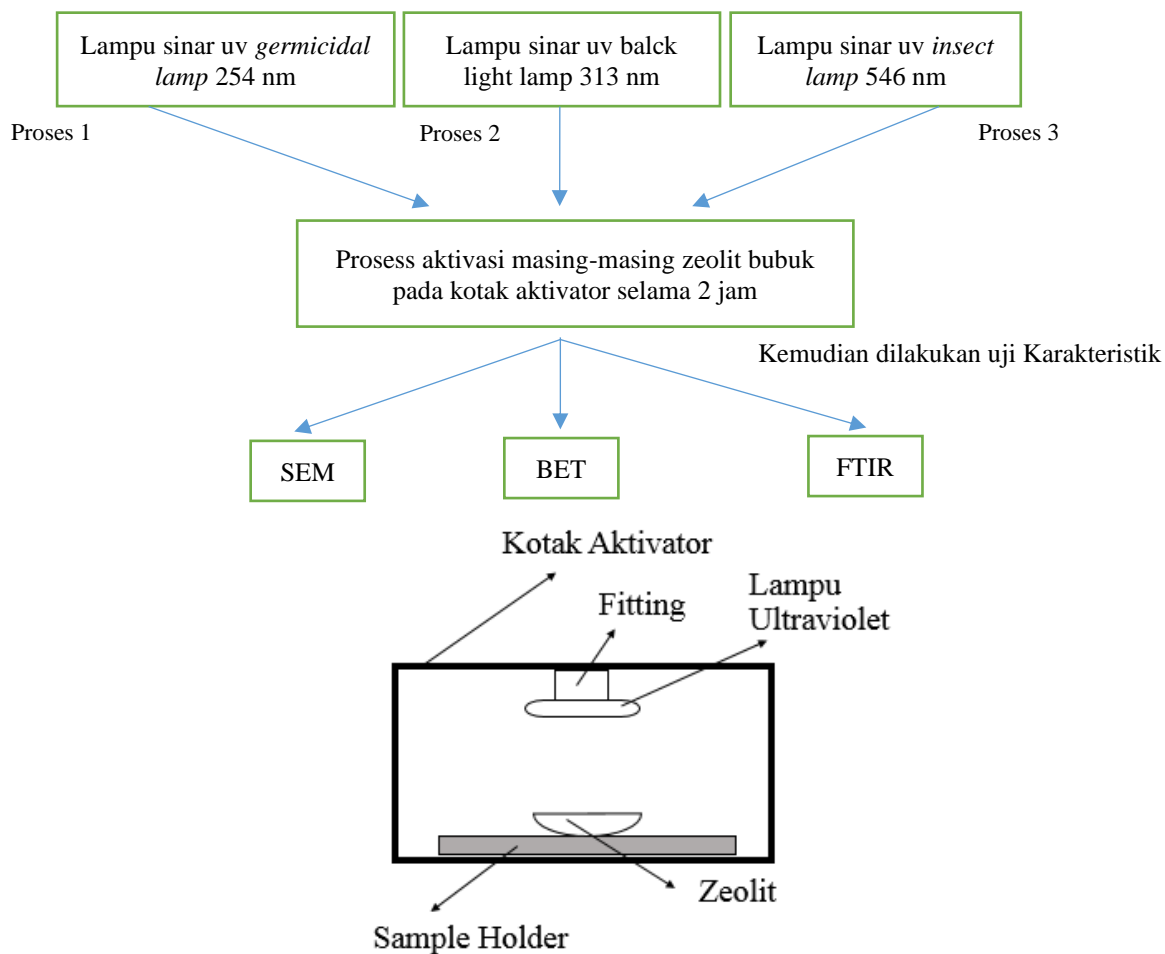
2.2 Metode Percobaan

2.2.1 Penghilangan Air Permukaan

Proses pertama yang dilakukan adalah memperkecil ukuran partikel zeolit menjadi serbuk zeolit dengan ukuran 200 mesh setelahnya dilakukan penghilangan air permukaan pada Zeolit Alam Lampung dengan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 2 jam.

2.2.2 Proses Aktivasi Zeolit

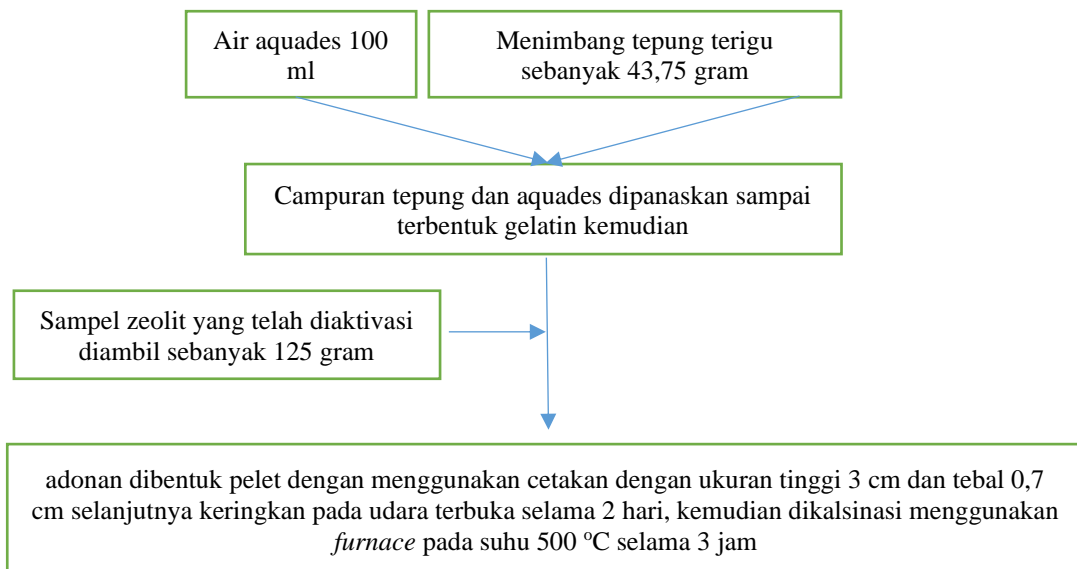
Setelah penghilangan air permukaan selanjutnya masing-masing serbuk zeolit diaktivasi didalam kotak aktivator dengan menggunakan lampu sinar ultraviolet, berikut metode aktivasi serbuk zeolit, proses aktivasi zeolit dengan sinar uv dijelaskan pada gambar 1:



Gambar 1. Aktivasi Zeolit Menggunakan Sinar UV dalam Kotak Aktivator

2.2.3 Proses Pembuatan Pelet Zeolit

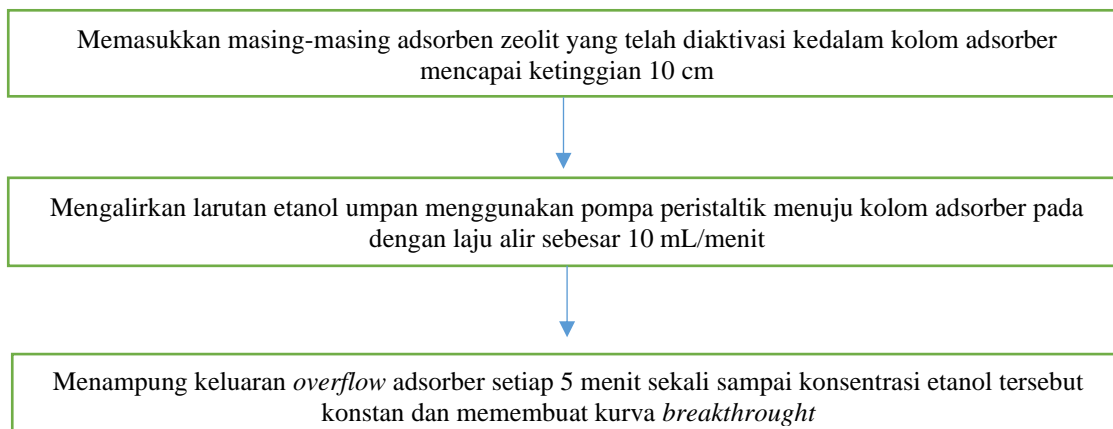
Kemudian di lakukan pembuatan zeolit dengan metode sebagai berikut:



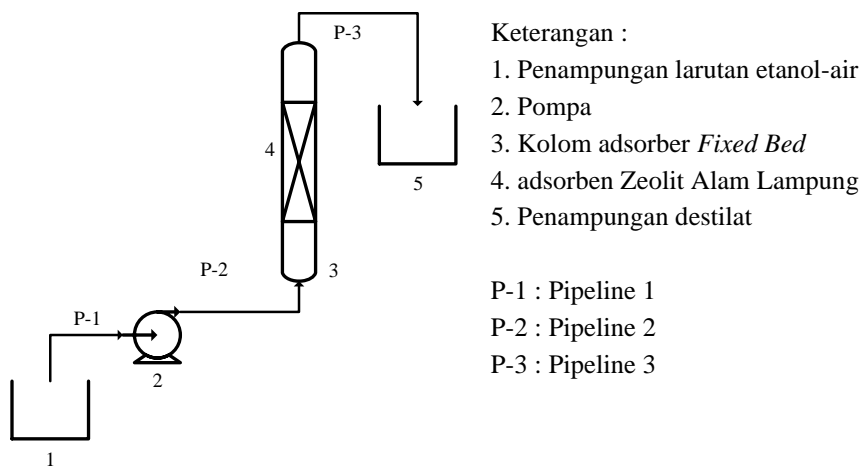
Gambar 2. Skematik Pembuatan Pelet Zeolit

2.2.4 Proses Adsorpsi Larutan Etanol

Setelah dilakukan pembentukan pelet, selanjutnya pelet zeolit digunakan dalam proses adsorpsi:



Gambar 3. Skematik Proses Adsorpsi Zeolit Alam Lampung



Gambar 4. Rangkaian Percobaan Proses Adsorpsi

3. Hasil dan Pembahasan

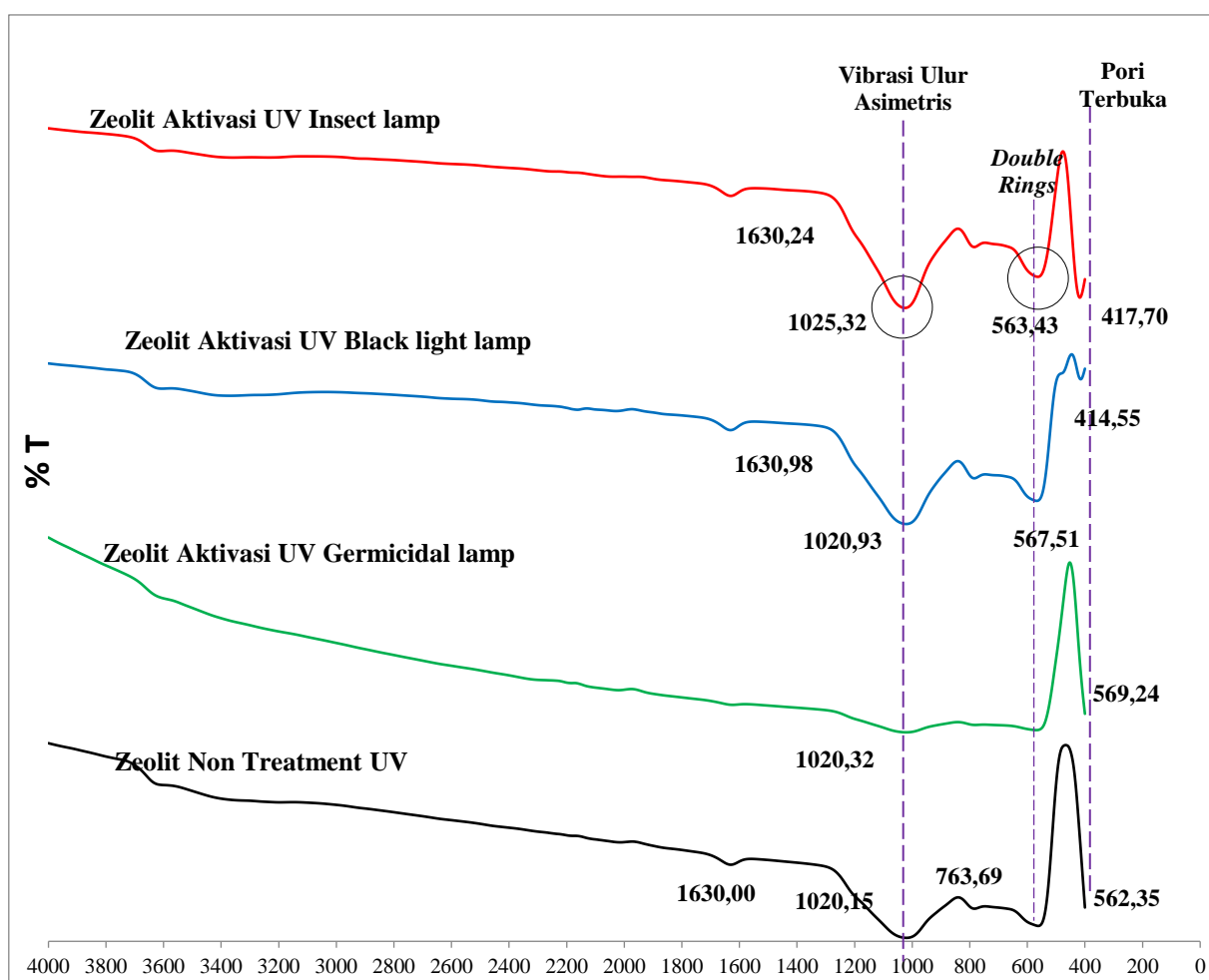
Hasil uji FTIR, BET dan SEM dan pembahasan disajikan seperti berikut :

3.1 Karakteristik *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Vibrasi yang digunakan untuk identifikasi adalah vibrasi tekuk, khususnya vibrasi *rocking* (goyangan), yaitu yang berada di daerah bilangan gelombang 2000 – 400 cm^{-1} . Karena di daerah antara 4000 – 2000 cm^{-1} merupakan daerah yang khusus yang berguna untuk identifikasi gugus fungsional. Daerah ini menunjukkan adsorpsi yang disebabkan oleh vibrasi regangan. Sedangkan daerah antara 2000 – 400 cm^{-1} sering kali sangat rumit, karena vibrasi regangan maupun bengkokan mengakibatkan absorpsi pada daerah tersebut.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil uji FTIR didapatkan data pada gambar 5, yang kemudian diinterpretasikan dengan data karakteristik pada zeolit yang terdapat pada tabel 1 menunjukkan adanya spektrum yang tersetap oleh zeolit sehingga memunculkan puncak (*peak*) pada grafik. Puncak tersebut mengindikasikan beberapa gugus fungsi yang memiliki daya penyerapan yang berbeda.

Jika dilihat secara keseluruhan zeolit yang diaktivasi dengan *germicidal lamp* merupakan zeolit yang memiliki persen serapan yang paling dalam diantara zeolit aktivasi lainnya, hal ini mengindikasikan bahwa zeolit ini mempunyai daerah penyerapan gelombang yang lebih luas dibandingkan dengan zeolit lainnya karena pada dasarnya penggunaan lampu *germicidal* ini digunakan untuk mematikan bakteri atau mikroorganisme yang lebih kecil dibanding memenerasi pori zeolit dengan cara merusak bagian DNA dari bakteri tersebut. (Kowalski, 2009; Miller, Linnes. 2013 dan Florea, BrA, Tucu. 2012)



Gambar 5. Kurva Uji Karakteristik FTIR Zeolit Alam Lampung

Tabel 1. Karakteristik FTIR pada Zeolit

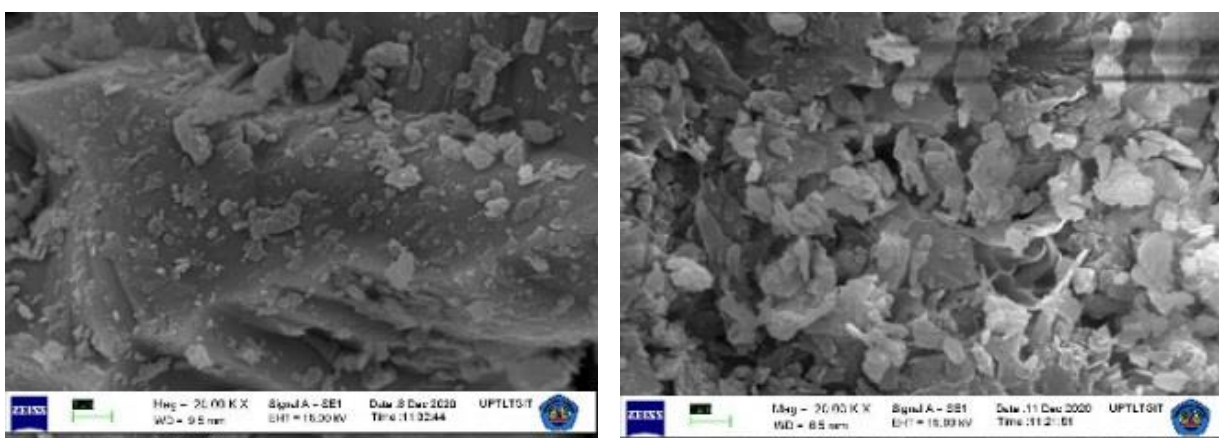
No	Nama	Panjang Gelombang (cm ⁻¹)	Keterangan
1.	Pore Opening	420 – 300	
2.	Vibrasi tekuk	500 - 420	SiO AlO
3.	Vibrasi Ulur Asimetris	900 - 1250	O – Si – O O – Al – O
4.	Vibrasi Ulur Simetris	650 - 850	OSiO OAlO
5.	Vibrasi Double Ring	500 - 650	(D ₄ R)
6.	Ikatan tetrahedral	300 – 1300	SiO ₄ ⁴⁻ dan AlO ₄ ⁵⁻
7.	Vibrasi Tekuk -OH	1600 - 3700	Si-OH

(Sumber :Santi K, 2010, Marwan F. dkk dan Mazur dkk., 2014)

Selain itu, pada gambar serapan pita menunjukkan adanya puncak pada panjang gelombang yang terdapat pada zeolit *non-treatment* 1630,00 cm⁻¹, *black light lamp* 1630,98 cm⁻¹ dan *Insect lamp* 1630,24 cm⁻¹ hal ini menyatakan keberadaan gugus -OH dengan ditandai oleh adanya gugus vibrasi tekuk Si-OH sedangkan pada *germicidal lamp* tidak ada. Pada spektrum zeolit *non-treatment* terdapat pada puncak 1020,15 cm⁻¹ yang berarti terdapat vibrasi ulur asimetris O – Si – O atau O – Al – O, kemudian pada puncak 783,69 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur simetris OSiO atau OAlO dan pada puncak 562,35 cm⁻¹ terdapat vibrasi *double ring* (D₄R). Pada spektrum zeolit aktivasi *germicidal lamp* terdapat pada puncak 1020,32 cm⁻¹ yang berarti terdapat vibrasi ulur asimetris gugus O – Si – O atau O – Al – O, kemudian pada puncak 781,15 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur simetris gugus OSiO atau OAlO dan pada puncak 569,24 cm⁻¹ terdapat vibrasi *double ring* (D₄R). Disamping itu pada zeolit yang diaktivasi menggunakan UV *black light lamp* memiliki karakteristik yang sama dengan zeolit yang diaktivasi dengan *germicidal lamp*, namun meskipun secara vibrasi cenderung sama tetapi secara penyerapan puncaknya berbeda antara lain, pada puncak 1020,95 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur asimetris gugus O – Si – O atau O – Al – O, kemudian pada puncak 784,38 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur simetris gugus OSiO atau OAlO dan pada puncak 567,51 cm⁻¹ terdapat vibrasi *double ring* (D₄R) dan juga pada puncak 414,55 cm⁻¹ terdapat vibrasi *pore opening* yang berarti bahwa pori-pori zeolit mulai terbuka dan pengotor mulai terdegradasi. Pada aktivasi zeolit menggunakan *insect lamp* pada puncak 1025,32 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur asimetris gugus O – Si – O atau O – Al – O, kemudian pada puncak 784,54 cm⁻¹ terdapat vibrasi ulur simetris gugus OSiO atau OAlO dan pada puncak 568,43 cm⁻¹ terdapat vibrasi *double ring* (D₄R) dan juga pada puncak 417,70 cm⁻¹ terdapat vibrasi *pore opening* yang berarti bahwa pori-pori zeolit mulai terbuka dan pengotor mulai terdegradasi.

3.2 Karakteristik Scanning Electron Microscopy (SEM)

Berdasarkan hasil pengamatan pada gambar 6 (A) terlihat bahwa permukaan zeolit yang digunakan sebagai bahan baku memiliki topografi yang rata dan terdapat padatan-padatan yang menempel pada area permukaannya. Selain itu untuk mengetahui topografi dari zeolit membutuhkan perbesaran yang tinggi yaitu 20.000 X. Hal ini tentunya dapat digunakan sebagai adsorben pada proses dehidrasi etanol, sehingga perlu dilakukan proses aktivasi yang bertujuan untuk membuka pori zeolit tersebut.



(a)

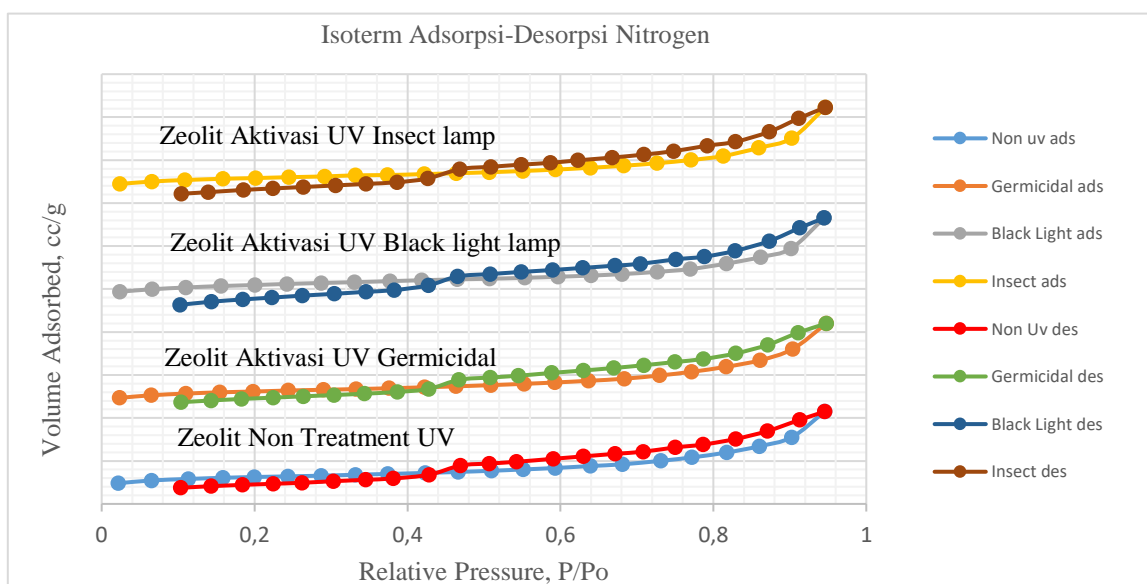
(b)

Gambar 6. Uji Karakteristik SEM Perbesaran 20.000 X (a) ZAL Murni (b) Aktivasi Lampu Sinar UV Germicidal

Pada gambar 6 (B) terlihat bentuk topografi zeolit yang lebih baik dibandingkan dengan gambar 6 (A). Hal ini disebabkan oleh adanya proses aktivasi oleh sinar *ultraviolet* yang diiradiasikan terhadap zeolit. Sinar UV yang digunakan ialah lampu *germicidal* (UV *germicidal lamp*), aktivasi dengan lampu sinar UV ini lebih baik dibandingkan dengan lainnya karena pada dasar penggunaannya digunakan untuk membunuh bakteri dengan cara menghancurkan DNA bakteri tersebut, sehingga ketika diaplikasikan pada aktivasi zeolit lebih mudah menembus topografi dan struktur zeolit. Terlihat jelas pori-pori yang dihasilkan oleh penetrasi irradiasi yang mengakibatkan terlepasnya ion-ion yang berikatan lemah pada permukaan zeolit. Perbesaran yang digunakan dalam mengidentifikasi topografi Zeolit Alam Lampung tidak terlalu besar yaitu 20.000X. Selain itu penetrasi irradiasi sinar UV juga dapat memutus rantai gugus -OH yang terdapat pada bagian dalam zeolit, sehingga terbentuk ruang/pori yang berfungsi sebagai penyerap bahan yang akan diserap pada proses adsorpsi nantinya. (Santi K, 2010)

3.3 Karakteristik Brunaur, Emmet dan Teller (BET)

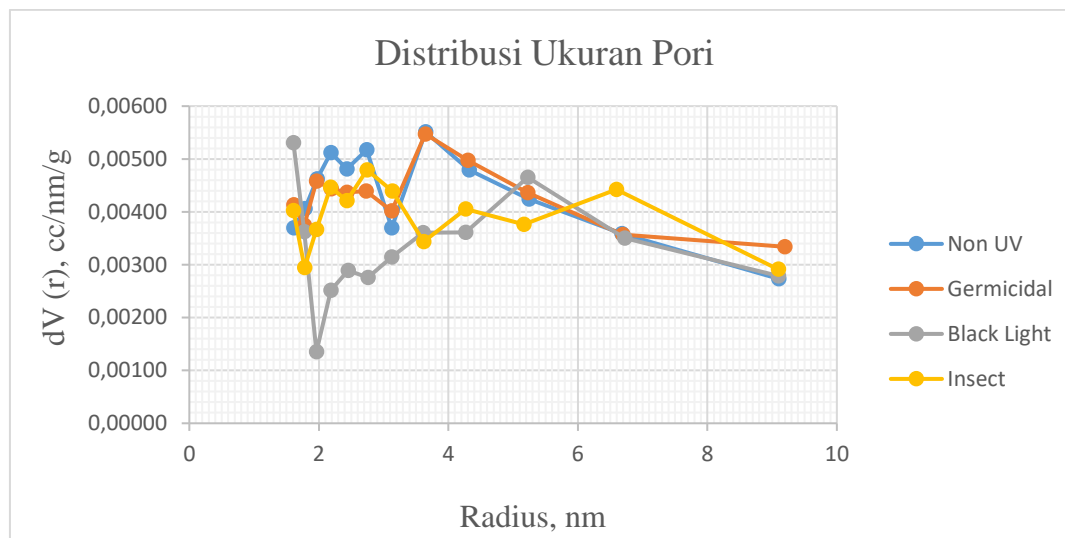
Dalam pengujian karakteristik BET, metode yang digunakan adalah dengan melakukan proses adsorpsi-desorpsi gas nitrogen terhadap sampel berupa zeolit yang nantinya akan di dapatkan hasil pengukuran berupa luas area permukaan, volume pori adsorben dan diameter pori (Ambroz F. dkk, 2018). Pada proses analisa BET ukuran pori dapat diketahui melalui grafik isoterm langmuir yang berdasarkan pada tekanan relatif P/P^0 terhadap volume N_2 per gram sampel (cc/gram). Berikut merupakan hasil analisa isoterm adsorpsi-desorpsi Zeolit Alam Lampung:



Gambar 7. Grafik Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Gas Nitrogen

Gambar 7 menunjukkan kemampuan Zeolit Alam Lampung yang telah diaktivasi dalam proses adsorpsi-desorpsi gas nitrogen, hal ini berkaitan dengan kemampuan fisik dari zeolit tersebut berdasarkan luas permukaan kontak, diameter pori dan volume pori. Dari keseluruhan data terlihat proses adsorpsi berlangsung hingga mencapai tekanan relatif P/P^0 sebesar 0,94 torr, dengan tekanan relatif P/P^0 awal adsorpsi pada masing-masing sampel yaitu 0,023 torr dengan volume adsorpsi zeolit *non treatment* 9,62499 cc/g, zeolit aktivasi UV *germicidal lamp* 9,34871 cc/g, zeolit aktivasi UV *blacklight lamp* 8,75930 cc/g dan zeolit aktivasi UV *insect lamp* 8,90977 cc/g. Selama proses adsorpsi gas nitrogen, seluruh sampel zeolit mengalami peningkatan volume adsorpsi, hal ini mengindikasikan bahwa pada masing-masing zeolit memiliki pori yang ukurannya tidak seragam. Setelah mencapai titik tertinggi antara tekanan relatif dan volume adsorpsi, adsorben zeolit mengalami proses desorpsi.

Proses desorpsi merupakan proses pelepasan kembali ion atau molekul yang telah berikatan dengan gugus aktif pada adsorben (Jankowska dkk, 1991). Pada proses desorpsi kurva mengalami penurunan karena adanya pelepasan gas nitrogen pada pori zeolit, secara keseluruhan proses desorpsi mengalami penurunan hingga tekanan 0,104 torr pada masing-masing sampel dengan volume desorpsi zeolit *non treatment* 7,5130 cc/g, zeolit aktivasi UV *germicidal lamp* 7,33119 cc/g, zeolit aktivasi UV *black light lamp* 2,67049 cc/g dan zeolit aktivasi UV *insect lamp* 4,32981 cc/g. Selama proses adsorpsi-desorpsi terjadi terdapat titik percabangan (histeris). Percabangan tersebut diakibatkan oleh fenomena kondensasi kapiler yang terjadi didalam pori material, kondensasi yang tertunda mengakibatkan adsorpsi yang bercabang dan membuat *loop* histerisis. Hal ini dapat terjadi karena tidak adanya kesetimbangan termodinamika yang tercapai selama proses adsorpsi berlangsung (Thommes, 2015).



Gambar 8. Grafik Distribusi Ukuran Pori

Berdasarkan gambar 8 diatas menunjukkan bahwa distribusi ukuran pori pada Zeolit Alam Lampung terjadi persebaran secara tidak merata, pada sebagian besar pori yang terdapat zeolit masih tergolong dalam mikropori dan mesopori. Pada sampel Zeolit Alam Lampung yang diaktivasi dengan sinar UV *black light lamp* terdapat volume pori yang kecil yaitu $dV = 1,352 \times 10^{-3}$ dengan diameter sebesar 1,96474 nm. Sedangkan pada data diameter 2-9 nm memiliki diameter yang besar dan volume pori yang besar juga. Hal ini berarti semakin besar ukuran volume pori dan diameter pori yang terbentuk, maka daya tampung senyawa yang terserap ke dalam pori-pori zeolit akan semakin banyak. Ukuran pori pada adsorben mempengaruhi kemampuan selektivitas zeolit terhadap senyawa yang akan masuk ke dalam pori-pori zeolit, dengan menggunakan metode uji karakteristik BET didapatkan data luas permukaan spesifik, volume pori dan diameter pori. Berikut merupakan representasi hasil analisis BET pada zeolit yang non aktivasi dan zeolit yang diaktivasi dengan menggunakan lampu sinar uv.

Tabel 2. Karakteristik Fisik Zeolit Alam Lampung

Sampel	Luas Permukaan (m ² /g)	Total Volume Pori (cc/gram)	Ukuran Pori Rat-rata (Å)
Non Treatment UV	41,331	0,0666	32,23
Aktivasi <i>Germicidal lamp</i> UV	41,158	0,0690	33,12
Aktivasi <i>Black light lamp</i> UV	40,399	0,0682	33,06
Aktivasi <i>Insect lamp</i> UV	38,796	0,0668	35,57

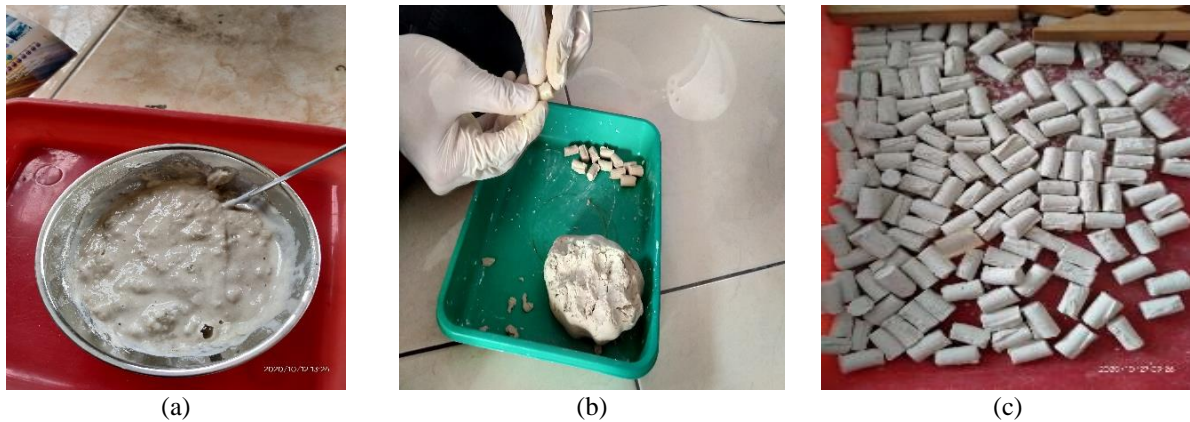
Berdasarkan data diatas terlihat bahwa pada luas permukaan Zeolit Alam Lampung terjadi penurunan dari 41,331 m²/g menjadi 38,795 m²/g. Sedangkan pada total volume pori terjadi peningkatan tertinggi dari 0,0666 cc/gram menjadi 0,0690 cc/gram dan pada ukuran pori terjadi peningkatan tertinggi dari 32,23 Å menjadi 35,57 Å. Hal ini dapat disimpulkan bahwa karakteristik yang dapat digunakan secara optimum ialah pada sampel zeolit alam Lampung yang diaktivasi dengan menggunakan *germicidal lamp* uv karena luas permukaan sebesar 41,158 m²/g, total volume pori sebesar 0,0690 cc/gram dan ukuran pori rata-rata sebesar 33,12 Å. Terjadinya proses penurunan luas permukaan dapat disebabkan oleh persebaran zeolit yang tidak merata saat dilakukannya proses aktivasi pada kotak aktivator, serta juga dipengaruhi oleh gelombang sinar uv yang tidak begitu besar untuk menembus tumpukan serbuk zeolit.

3.4 Pembuatan Pelet Zeolit

Setelah diaktivasi selanjutnya dilakukan pembentukan pelet yang bertujuan agar selama proses adsorpsi air zeolit tidak terbawa oleh aliran etanol. Proses pembentukan pelet zeolit yang ditunjukkan pada gambar 9 dilakukan dengan menggunakan bahan perekat (*binder*) yang berasal dari pati. Jenis pati yang dapat digunakan sebagai perekat diantaranya tepung terigu, tepung tapioka, tepung beras dan tepung jagung. Jenis pati yang paling baik untuk digunakan sebagai perekat zeolit adalah dari tepung terigu dengan komposisi 35% berat zeolit (Ma'ruf, A., dan Mulyadi, A.H., 2010).

Berdasarkan hasil tersebut pada penelitian ini bahan perekat yang digunakan adalah tepung terigu dengan komposisi 35% berat zeolit. Untuk membuat pelet zeolit hal pertama yang dilakukan adalah membuat perekatnya dengan memanaskan air hingga mendidih selanjutnya memasukkan tepung terigu kemudian mengaduknya hingga membentuk gelatin. Setelah membentuk gelatin selanjutnya campur dengan zeolit yang berukuran 200 mesh dan kemudian dibentuk menggunakan pencetak dengan ketinggian 3 cm dan ketebalan 0,7 cm. Kemudian keringkan pelet

zeolit pada udara terbuka selama 2 hari, setelahnya dilakukan proses kalsinasi pada suhu 500 °C selama 3 jam, yang bertujuan untuk menghilangkan tepung terigu dan proses aktivasi zeolit lebih lanjut berikut adalah gambar pelet zeolitnya.



Gambar 9. (a) Gelatin Zeolit, (b) Adonan Zeolit Padat, dan (c) Pelet Zeolite

3.5 Durabilitas Pelet Zeolit

Setelah mengalami proses kalsinasi bentuk morfologi zeolit masih tetap sama yaitu berbentuk silinder dengan struktur yang kokoh, namun dalam hal warna terjadi perubahan menjadi berwarna abu-abu hal ini mengindikasikan terjadinya pelepasan tepung terigu dari zeolit yang sebelumnya berwarna hitam saat proses akibat terjadi pemanasan yang tinggi.

Dalam menentukan durabilitas (daya tahan) Zeolit Alam Lampung tahap awal uji dilakukan perendaman selama 24 jam dengan menggunakan air, diperoleh hasil zeolit yang masih utuh seperti bentuk awal. Kemudian setelahnya dilakukan percobaan adsorpsi selama 55 menit dengan laju alir sebesar 10 mL/menit dalam larutan etanol, didapatkan hasil yang masih utuh pada bentuk aslinya dan larutan tetap jernih seperti pada gambar 10 dibawah. Hal ini berarti zeolit mempunyai ketahanan yang cukup baik jika digunakan sebagai adsorbent.



Gambar 10. Durabilitas Zeolit

3.6 Hasil Uji Adsorpsi

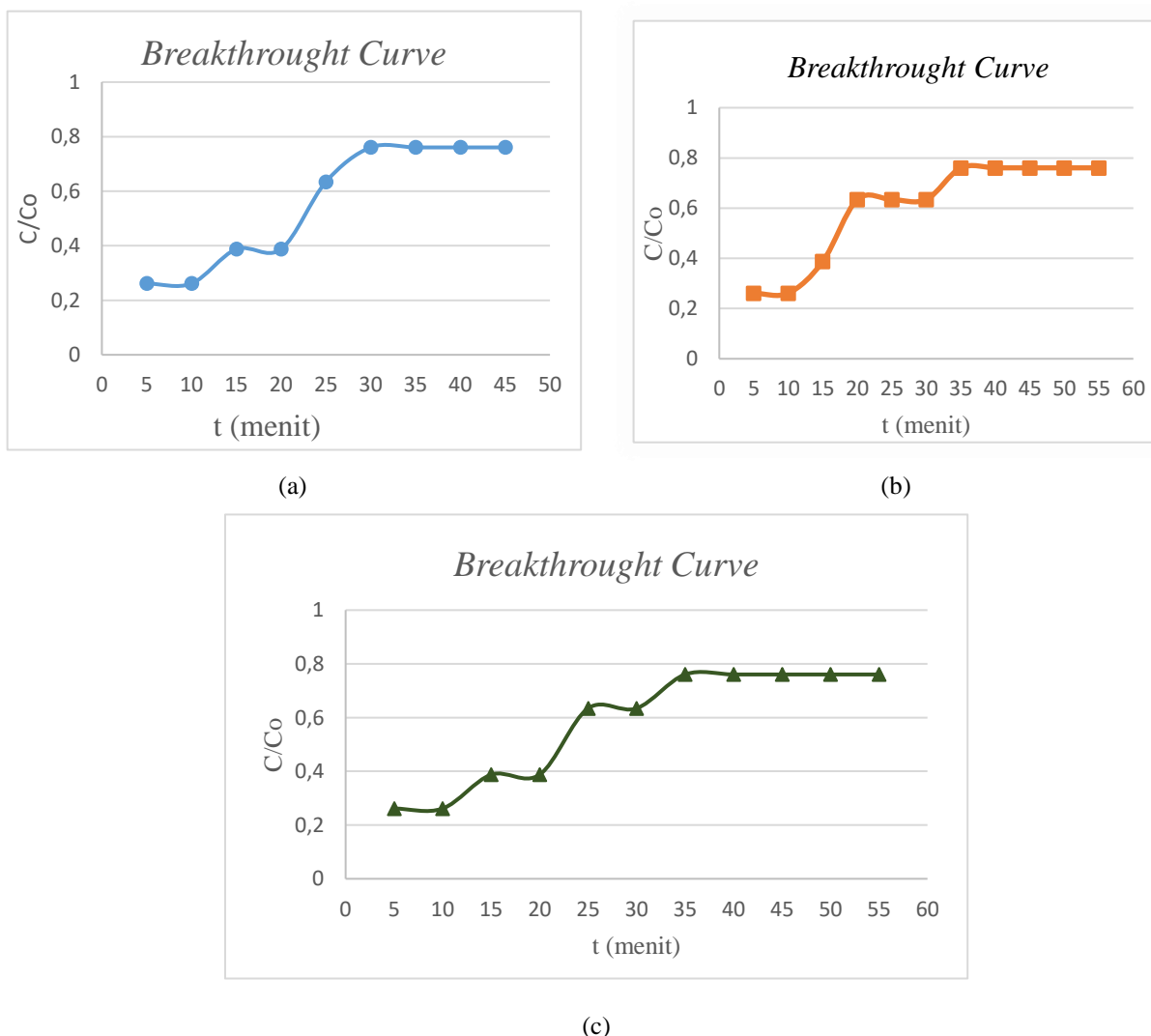
Adsorpsi merupakan suatu proses yang terjadi ketika suatu (cairan maupun gas) yang menempel pada satuan padatan (adsorben) dan akhirnya membentuk suatu film (lapisan tipis) pada permukaan padatan tersebut. Molekul fluida yang berinteraksi dan melekat pada adsorben disebut adsorbat, sedangkan yang tidak melekat disebut adsorptif. Setelah dilakukan serangkaian proses aktivasi Zeolit Alam Lampung, didapatkan hasil adsorpsi air dalam etanol sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Adsorpsi Air dalam Etanol

Sample	t (menit)	Konsentrasi % (v/v)	C/Co
Zeolit <i>Germicidal lamp</i>	45	98,69	0,76
Zeolit <i>Blacklight lamp</i>	55	98,69	0,76
Zeolit <i>Insect lamp</i>	55	98,69	0,76

Berdasarkan tabel 3 diatas hasil terbaik didapatkan oleh zeolit yang diaktivasi dengan menggunakan *germicidal lamp* yang mempunyai konsentrasi akhir sebesar 98,69 % v/v dengan jumlah penyerapan air sebesar 76% dalam waktu 45 menit. Waktu penyerapan pada zeolit ini lebih cepat dikarenakan tidak adanya gugus Si-OH sehingga penyerapan yang dilakukan menjadi lebih maksimal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin luas permukaan zeolit akan banyak air yang terjerap dalam pori-pori zeolit. Karena sifat air adalah polar yang mudah mengisi ruang kosong pada pori-pori zeolit.

Selain itu, data hasil dari proses adsorpsi juga direpresentasikan dengan menggunakan *breakthrough curve*. Data yang disajikan terdiri atas konsentrasi akhir air dalam etanol berbanding terhadap lamanya waktu proses adsorpsi. Berdasarkan data hasil penelitian berikut merupakan kurva *breakthrough* yang terjadi berdasarkan aktivasi masing-masing zeolit.



Gambar 11. Kurva *Breakthrough* Zeolit Aktivasi a). *Germicidal Lamp*, b). *Black Light Lamp* dan P c). *Insect Lamp*

Berdasarkan kurva breakthrough tersebut diatas bahwa terjadi penyerapan air (*break point*) oleh zeolit yang diaktivasi menggunakan *black light lamp* (pada gambar 11 B) dan *insect lamp* (pada gambar 11 C) pada menit ke-5 hingga menit ke-35 sedangkan pada zeolit yang diaktivasi menggunakan *germicidal lamp* (pada gambar 11 A) terjadi

penyerapan pada menit ke-5 hingga menit ke-30, hal ini terjadi secara cepat karena sebelumnya zeolit telah melakukan penyerapan air selama proses pengisian kolom adsorpsi. Selama fluida melewati bed, konsentrasi fluida akan mengalami penurunan sangat cepat menuju konstan sebelum akhir pada *bed* yang telah banyak air (Geankoplis, 1978). Zona perpindahan massa terjadi akibat adanya penyerapan air yang terjadi pada rongga zeolit terhadap larutan etanol. Hal ini terjadi karena sifat air yang polar dan memiliki diameter molekul yang lebih kecil dari pada zeolit, maka air dapat mengisi rongga zeolit yang kosong. Molekul air (H_2O) mempunyai diameter sebesar $2,75 \text{ \AA}$ dan diameter molekul etanol (C_2H_5OH) sebesar $4,40 \text{ \AA}$ (Perry, 1997). Rongga-rongga zeolit tersebut kosong akibat dari adanya proses aktivasi dengan menggunakan sinar *ultraviolet* dan kalsinasi pada zeolit, sehingga ion/molekul yang mudah volatil akan terlepas yang mengakibatkan rongga transfer massa akan semakin besar.

Pada menit ke-30 dan ke-35 terjadi peristiwa konstannya penyerapan air, hal ini terjadi akibat tidak adanya *driving force* yang bekerja sebab konsentrasi pada larutan etanol sama dengan konsentrasi pada pori-pori zeolit, hal ini berarti pori-pori zeolit telah penuh oleh air yang berpindah dari larutan etanol menuju ruang pori pada zeolit.

Kesimpulan

Terdapat penurunan luas permukaan zeolit saat proses aktivasi disebabkan oleh persebaran zeolit yang tidak merata saat dilakukannya proses aktivasi pada kotak aktivator, serta juga dipengaruhi oleh gelombang sinar UV yang tidak begitu besar untuk menembus tumpukan serbuk zeolit. Serta diperoleh hasil aktivasi yang optimum dengan luas permukaan $41,158 \text{ m}^2/\text{g}$, total volume pori $0,0690 \text{ cc}/\text{gram}$ dan ukuran pori rata-rata $33,15 \text{ \AA}$ dan data dehidrasi $98,69\%$ dalam waktu 45 menit dengan menggunakan zeolit yang teraktivasi sinar uv germicidal lamp.

Daftar Pustaka

- Amrbroz F., Macdonald T.J., Martis V., Parkin I. P., (2018). Evaluation of The BET Theory for the Characterization of Meso and Microporous Mos. Amerika Serikat. Wiley Online Library.
- Deepak P., S., Dilli R., R., Raju B., T., (2009). Effect of UV-Treatment On The Wettability of Polycarbonate. Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology Vol. 5, No. II, September, 2009, Hal. 37-41.
- Florea, C., G. BrÄ, Tucu. (2012). "Possibilities of using the germicidal effect of UV-C light for disinfecting the water used in food industry." Bulletin of the Transilvania University of Brasov **5** (54). Hal. 147-154.
- Geankoplis, C. J., 1993. Transport Processes and Unit Operations. 3rd edition. Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company. United States of America. Hal. 701-702.
- Handrian, Budi Wahyu S. and Mindaryani A., (2017). Adsorpsi Air dari Campuran Uap Etanol-Air dengan Zeolit Sintesis 4A Pada Packet Bed Dalam Rangka Produksi Fuel Grade Etanol. Jurnal Rekayasa Proses, Vol. 11, No. 2, Hal. 68-77. Yogyakarta.
- Jankowska, H., Swiatkowski, A. dan Choma, J. (1991). *Active Carbon*. London : Horwood.
- Kowalski, W. (2009), Ultraviolet Germicidal Irradiation handbook. Sringer-Verlag. Berlin Heidelberg
- Marwan F., Suhartana, Pardoyo. (2015). Zeolit Alam Termodifikasi Logam Fe sebagai Adsorben Fosfat (PO_4^{3-}) pada Air Limbah. Semarang. Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi **18** (3) (2015) Hal. 94.
- Ma'ruf, A., dan Mulyadi, A.H., 2010, "Pembuatan Zeolit Pelet Sebagai Adsorben Pada Pembuatan Bioetanol Tradisional", Laporan Penelitian, Program Studi Teknik Kimia, UMP, Purwokerto.
- Mazur M, Eliasova P C, Roth WJ, Cejka J. (2014), *Intercalation chemistry of layered zeolite precursor IPC*
- Miller, S. L., J. Linnes . (2013). Ultraviolet Germicidal Irradiation: Future Direction for Air Desinfection and Building Application. Photochemistry and Photobiology **89**(4). Hal. 777 – 781
- Nurdyastuti, I. (2005). Teknologi Proses Produksi Bio-Ethanol. Prospek pengembangan bio-fuel sebagai substitusi bahan bakar minyak.
- Perry, R.H., and Green, D.W., (1997). Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7th Edition, Hal.1128, 1490-1497, 1534-1537, Mc Graw-Hill Co, New York.
- Santi, K. (2010). Zeolit In Industrial Separation And Catalysis, Process Engineering Channel, Wiley-VCH Verlag GmbH &Co. KgaA, Weinheim USA.
- Setyawan P. Sakti, Masruroh, Nike H., (2017). Effect UV Radiation duration and Moleculer Wiegth to Hidropobicity and Surface Roughness of Polystyrene Coating On QCM sensor. Jurnal Teknologi. Hal. 61-67. Departemen of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Brawijaya University, Jl. Veteran, Malang 65145, Indonesia.
- Slamet, Ellyana M., dan Bismo S., (2018). Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan Fotokatalisis TiO_2 Melalui Metode Sol Gel dan Aplikasinya Untuk Penyisihan Fenol. Depatemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Hal. 2-3. Depok.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. and Sing, K.S. (2015) Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, **87**, 1051-1069.

Studi Awal Pembuatan *Polymer Matrix Composite* (PMC) Epoksi yang Didoping Nanopartikel ZnO sebagai Material Antibakteri

Manty Aldilani Ikaningsih¹, Ghazi Alwan Rafi¹, Djoko Hadi Prajitno^{1,2}

¹Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi – Bandung, Indonesia

²Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan (PSTNT) Batan, Bandung, Indonesia

manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id, ghazyalwan12@gmail.com, djokohp@batan.go.id

Abstrak

Bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi dapat mengakibatkan timbulnya infeksi atau penyakit dalam rongga mulut. Oleh karena itu, material antibakteri mulai banyak diteliti untuk menghambat pertumbuhan bakteri, bahkan membunuh bakteri. Pada penelitian ini dilakukan studi awal mengenai *polymer matrix composite* (PMC) dengan matriks epoksi yang didoping dengan nanopartikel ZnO sebagai material antibakteri pada sikat gigi. Matriks epoksi, *hardener* dan nanopartikel ZnO dicampur hingga homogen dan selanjutnya dicetak seperti sikat gigi. Perbandingan resin dan *hardener* divariasikan 1R:1H dan 2R:1H dengan variasi jumlah nanopartikel ZnO sebesar 0%; 0,6% dan 0,9%. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), kekerasan, *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) dan bending dilakukan untuk mengetahui karakteristik PMC yang dihasilkan. Nilai kekerasan dari PMC dengan doping nanopartikel ZnO 0%; 0,6% dan 0,9% berturut-turut adalah 55,6; 58,5; 60,5 untuk 1R:1H dan 73,3; 74,3; 74,8 untuk 2R:1H. Berdasarkan data hasil pengujian didapat bahwa nilai kekerasan semakin tinggi seiring dengan meningkatnya jumlah nanopartikel ZnO dan jumlah resin yang digunakan. Untuk pengujian sifat antibakteri, penambahan jumlah nanopartikel ZnO mengakibatkan peningkatan sifat antibakteri dari PMC.

Kata kunci: antibakteri, epoksi, nanopartikel ZnO, *polymer matrix composite* (PMC)

Abstract

Bacteria that stick to and accumulate on the toothbrush can cause infection or disease in the oral cavity. Therefore, many antibacterial materials are being researched to inhibit bacterial growth, even kill bacteria. In this preliminary research, polymer matrix composite with an epoxy matrix doped with ZnO nanoparticles was carried out as an antibacterial material on toothbrushes. The epoxy matrix, hardener, and ZnO nanoparticles are mixed until they are homogeneous and then printed like a toothbrush. The ratio of resin and hardener varied 1R:1H and 2R:1H with variations of ZnO are 0%; 0.6% and 0.9%. XRD, hardness, FTIR, and bending tests have been carried out to determine the characteristics of PMC. The hardness of PMC with ZnO 0%; 0.6%; 0.9% respectively are 55.6; 58.5; 60.5 for 1R:1H and 73.3; 74.3; 74.8 for 2R:1H. Testing for antibacterial properties using a spectrophotometer with the optical density method was carried out to determine the antibacterial. The highest antibacterial properties were PMC with ZnO 0.9% 2R:1H. Based on data, it was found that the hardness was getting higher along with the increasing ZnO nanoparticles and the ratio of resin. For testing antibacterial properties, increasing ZnO nanoparticles resulted in an increase in the antibacterial properties.

Keywords: antibacterial, epoxy, ZnO nanoparticle, polymer matrix composite (PMC)

1. Pendahuluan

Sikat gigi merupakan suatu alat yang digunakan untuk membersihkan rongga mulut, termasuk gigi dan gusi. Sikat gigi ini sangat mudah terkontaminasi, baik dari dalam rongga mulut maupun dari lingkungan. Bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi dapat mengakibatkan penyakit dalam rongga mulut. Akan tetapi, sebagian besar orang meletakkan sikat gigi ke dalam gelas atau memasukkannya ke dalam penutup (pelindung sikat gigi) setelah digunakan. Hal tersebut sangat berpeluang menumbuhkan bakteri dan kuman karena tempatnya yang lembab. Oleh karena itu, para ahli menganjurkan untuk mengganti sikat gigi setidaknya setiap 3-4 bulan sekali.

Dewasa ini, sikat gigi mulai dibuat dari bahan yang mengandung anti bakteri. Beberapa merk bahkan sudah mengeluarkan produk tersebut. Produk ini diharapkan bisa menghambat pertumbuhan bakteri, bahkan membunuh bakteri yang menempel dan menumpuk di sikat gigi.

Gugus fungsi epoksi membentuk ikatan silang melalui mekanisme kondensasi dengan *hardener*. Dengan katalis yang sesuai, seperti boron trifluorida atau amina tersier, epoksi dapat membentuk polimer dengan sendirinya. Epoksi

Info Makalah:

Dikirim : 02-16-22;

Revisi 1 : 04-20-22;

Diterima : 04-22-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 813-2077-7086

e-mail : manty.aldilani@lecture.unjani.ac.id

merupakan polimer jenis termoset yang memungkinkan adanya penambahan rantai dan terjadinya ikatan silang tanpa eliminasi produk kondensasi, seperti air. Penyusutan material epoksi pun lebih rendah dibandingkan polimer jenis termoset yang lainnya. Kekurangan dari resin epoksi adalah perlunya pemanasan pada material prekursor sebelum diproses. Selain itu, sistem formulasi resin epoksi seringkali

membutuhkan keahlian khusus untuk epoksi dasar dan *hardener* dari pabrik yang berbeda (Gibson, 2017). Resin epoksi memiliki sifat antibakteri, sehingga berpotensi besar digunakan dalam dunia medis dan elektronik. Ada dua metode umum yang digunakan untuk meningkatkan sifat antibakteri dari resin epoksi, yaitu mengubah struktur kimia dan menambahkan agen antibakteri. Diantara kedua metode tersebut, penambahan agen antibakteri adalah metode yang paling efektif (Wu et al., 2020). Beberapa nanopartikel antibakteri yang telah dikembangkan antara lain nanopartikel perak, ZnO, CuO, dan TiO₂ (Chavali & Nikolova, 2019; Droval et al., 2008; Kumar et al., 2017; Prasanna et al., 2019). Kelebihan dari material antibakteri anorganik dibandingkan dengan material antibakteri organik adalah daya tahan yang lebih unggul, toksisitas yang lebih rendah, selektivitas yang lebih besar dan tahan panas (Padmavathy & Vijayaraghavan, 2008).

ZnO merupakan material semikonduktor tipe n, telah dieksplorasi secara luas sebagai agen antimikroba. ZnO bersifat biokompatibel, tidak beracun dan memiliki sifat fotokimia yang stabil. Luas permukaan nanopartikel ZnO berhubungan dengan aktivitas antibakteri. Semakin besar luas permukaan, maka akan meningkatkan sifat antibakteri. Begitupun sebaliknya, luas permukaan yang kecil akan mengurangi sifat antibakterinya (Kumar et al., 2017). Data awal menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki efek antibakteri yang secara signifikan lebih tinggi pada *Staphylococcus aureus* dibandingkan dengan nanopartikel MgO, TiO₂, Al₂O₃, CuO dan CeO₂. Data penelitian menunjukkan nanopartikel ZnO berpotensi sebagai agen bakteriostatik pada sinar tampak dan pengembangan agen turunan untuk mengendalikan penyebaran dan infeksi berbagai jenis bakteri (Jones et al., 2007).

Droval, et al (2008) melakukan pengujian aktivitas antimikroba pada campuran polimer poly(amide) 6 dan LDPE yang ditambahkan dengan ZnO Droval, et al (2008) melakukan pengujian aktivitas antimikroba pada campuran polimer poly(amide) 6 dan LDPE yang ditambahkan dengan ZnO terhadap bakteri *E. coli*, *St. aureus* dan *A. niger*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO sebesar 1% ke dalam polimer memperlihatkan aktivitas antibakteri yang besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO sebesar 1% ke dalam polimer memperlihatkan aktivitas antibakteri yang besar (Droval et al., 2008)..

Hrenovic, et al., 2012 menyelidiki aktivitas antimikroba dari nanopartikel Cu₂O, ZnO dan NiO yang didukung klinoptilolit alami dalam limbah sekunder dalam kondisi gelap. Setelah 24 jam kontak dengan nanopartikel Cu₂O dan ZnO, jumlah sel bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* dalam kultur murni sebanyak empat hingga enam kali dan menunjukkan aktivitas antibakteri yang konsisten terhadap *E. Coli* setelah 1 jam kontak selama 48 exposure. Aktivitas antibakteri nanopartikel NiO kurang efisien. Nanopartikel oksida dapat diaplikasikan untuk desinfeksi efluen dan penghilangan mikroorganisme patogen pada tahap tersier dalam pengolahan air limbah (Hrenovic et al., 2012).

Azam, et al. 2014 menyelidiki aktivitas antimikroba dari nanopartikel ZnO, CuO dan Fe₂O₃ terhadap bakteri Gram positif (*Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis*) dan Gram negatif (*Escherichia coli* dan *Pseudomonas aeruginosa*). Diantara ketiga nanopartikel tersebut, ZnO menunjukkan aktivitas antimikroba yang tertinggi terhadap kedua jenis bakteri Gram positif dan Gram negatif tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berpotensi bakterisida terbaik, sedangkan nanopartikel Fe₂O₃ menunjukkan aktivitas bakterisida yang kurang baik. Secara keseluruhan, aktivitas antibakteri secara berurutan: ZnO > CuO > Fe₂O₃ (Azam et al., 2012).

Bawardi, 2018 dari Institut Pertanian Bogor membuat biofilm dari pati 75anjang dengan penambahan nanopartikel ZnO. Biofilm pati 75anjang yang mengandung nanopartikel ZnO ini dapat digunakan sebagai bahan kemasan makanan dengan sifat antibakteri. Terbukti dari hasil penelitian menunjukkan biofilm dengan 2% ZnO mampu memberikan nilai hambat sebesar 7,67 mm terhadap bakteri *E. Coli*. Perkiraan masa aktif daya hambat ZnO terhadap bakteri *E. Coli* yaitu konsentrasi 1% dengan masa aktif 51,97 hari dan 49,97 hari untuk konsentrasi 2%. Sedangkan terhadap *Salmonella sp.* yaitu konsentrasi 1% dengan masa aktif 83,17 hari dan 169,17 hari untuk konsentrasi 2% (Bawardi, 2018).

Pada penelitian ini akan dibuat *polymer matrix composite* (PMC) dengan matriks epoksi yang didoping dengan filler nanopartikel ZnO. PMC ini diharapkan dapat digunakan sebagai material sikat gigi anti bakteri yang dapat membunuh bakteri yang menempel dan menumpuk pada sikat gigi, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya infeksi di dalam mulut. Pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian SEM-EDS dan pengujian aktivitas bakteri untuk melihat efektivitas sifat anti bakteri.

2. Metode

Material yang digunakan dalam penelitian ini antara lain resin epoksi, serbuk nanopartikel ZnO, *hardener*, dan larutan kaldu. Adapun alat yang digunakan adalah neraca atau timbangan, durometer gelas kimia, batang pengaduk, dan gelas ukur. Matriks epoksi, *hardener* dan serbuk nanopartikel ZnO sebagai *filler* dicampurkan hingga homogen. Perbandingan antara resin epoksi dan *hardener* adalah 1R:1H dan 2R:1H. Serbuk nanopartikel ZnO ditambahkan dengan beberapa variasi, yaitu 0%; 0,6% dan 0,9%. Setelah homogen, campuran tersebut dicetak seperti sikat gigi dan dibiarkan dingin dengan waktu *curing* selama 3 hari. Proses pencampuran dan pendinginan PMC epoksi dengan doping ZnO ini dilakukan pada temperatur kamar.



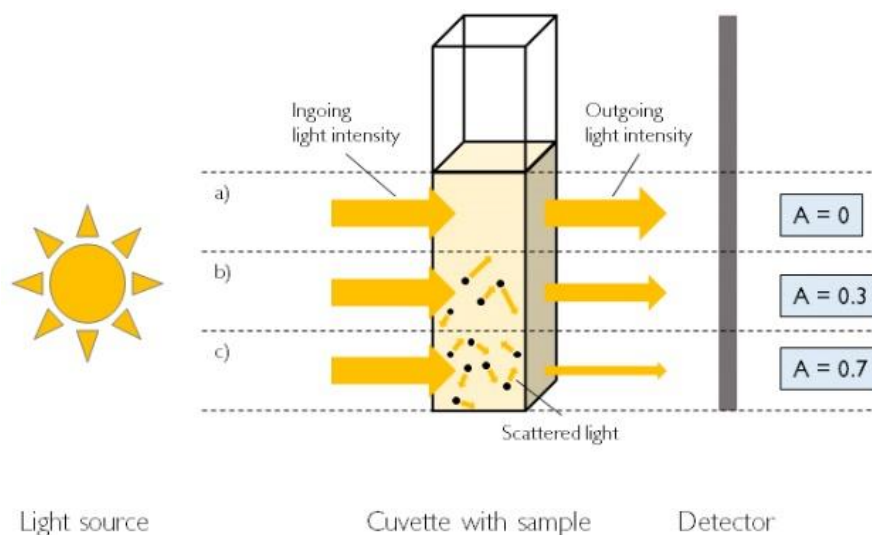
Gambar 1. Bentuk *Polymer Matrix Composite* (PMC)

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa pengujian antara lain *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), kekerasan dan *bending*. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi dan ukuran partikel dari serbuk nanopartikel ZnO yang digunakan. Pengujian FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dari material PMC yang telah dibuat. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material PMC yang telah dibuat. Penggunaan kekerasan dilakukan dengan menggunakan durometer *type D* dengan indenter berbentuk kerucut.

Pengujian *bending* dilakukan untuk mengukur kekuatan bending dari material PMC yang telah dibuat. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pengembangan Paduan dan Karakterisasi Institut Teknologi Bandung. Pengujian *bending* ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji *bending* merk Hung Ta yang dilengkapi dengan data tambahan berupa data uji tarik. Berdasarkan standar ASTM D790-03, perhitungan modulus elastisitas *bending* menggunakan rumus berikut: (ASTM INTERNATIONAL, 2002)

(1)

Pengujian antibakteri dilakukan untuk mengidentifikasi sifat antibakteri dari PMC yang telah dibuat. Pengujian antibakteri ini dilakukan dengan metode *optical density*. Pada metode *optical density* ini, *optical density* dari suatu medium diukur dalam kurun waktu tertentu untuk mengetahui pertumbuhan bakteri dalam medium tersebut. Pengujian dengan metode *optical density* ini cukup sederhana karena tidak ada penambahan zat kimia ataupun proses khusus (Kumar et al., 2017). Pengukuran nilai *optical density* dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan pada panjang gelombang 600 nm.



Gambar 2. Prinsip Pengukuran Metode *Optical Density* (a) tanpa bakteri; (b) densitas bakteri rendah; (c) densitas bakteri tinggi (HT, 2020)

Medium pertumbuhan bakteri yang digunakan dalam penelitian ini berupa larutan. Selanjutnya PMC yang telah dibuat dicelupkan ke dalam larutan kaldu tersebut untuk mengidentifikasi sifat antibakteri dari PMC. Selama masa inkubasi, kekeruhan larutan kaldu akan semakin meningkat. Nilai absorbansi yang terukur menunjukkan densitas bakteri dalam medium larutan kaldu.

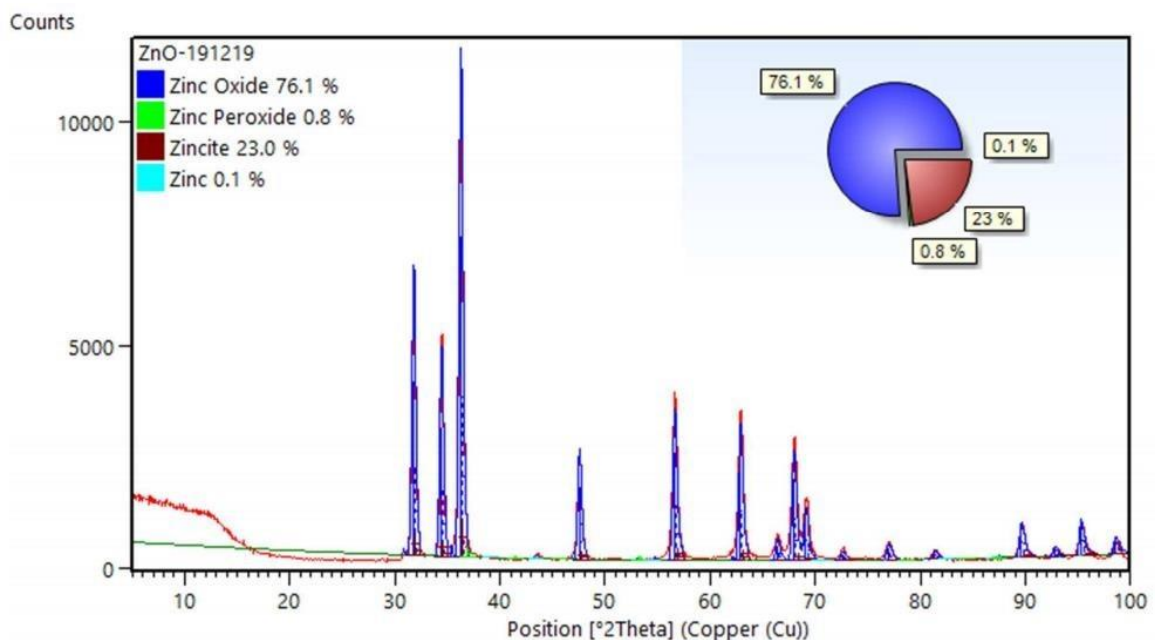


Gambar 3. Larutan Kaldu yang Digunakan Sebagai Media Pertumbuhan Bakteri

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Hasil pengujian XRD ditunjukkan pada Gambar 4. Dari pengujian XRD ini diperoleh komposisi serbuk dan *derived data* berupa ukuran dari serbuk yang digunakan dalam penelitian ini. *Derived data* dari pengujian XRD ini ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa serbuk yang digunakan dalam penelitian ini benar merupakan senyawa ZnO yang berukuran sebesar 257,0 Å (25,7 nm) dan 250,5 Å (25,05 nm). Ukuran ini termasuk ke dalam ukuran nanopartikel. Seperti yang telah diketahui, nanopartikel merupakan partikel yang berukuran kurang dari 100 nanometer ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$) (Callister & Rethwisch, 2009).



Gambar 4. Hasil Pengujian XRD

Micro Strain ...	0.120	Micro Strain [%]	0.091
Micro Strain ...	1E-5	Micro Strain ESD	0
Crystallite Si...	257.0	Crystallite Size [Å]	250.5
Crystallite Si...	0	Crystallite Size ESD	0
Density [g/c...	5.67	Density [g/cm ³]	5.67
F000	76	F000	76
Chemical For...	O2.00 Zn2.00	Chemical Formula	O2....
Formula Mass	162.76	Formula Mass	162...
R Bragg	9.55	R Bragg	9.78
Weight Perc...	100	Weight Percentage [%]	100
Recalculated...	0	Recalculated Weight P...	0
As Received...	0	As Received Weight P...	0

(a)

(b)

Gambar 5. Derived Data Pengujian XRD (a) Zinc Oxide dan (b) Zincite

Semakin kecil ukuran nanopartikel ZnO, maka semakin efektif menghambat perkembangan bakteri (Pasaribu & Saragih, 2013). Ukuran partikel yang semakin kecil mengakibatkan luas permukaan efektif dari material antibakteri yang menghambat pertumbuhan bakteri semakin meningkat. Dengan kata lain, dengan ukuran nanopartikel yang semakin kecil, sifat antibakteri dari material antibakteri akan semakin baik dan efektif. Selain itu, ZnO pun merupakan material oksida yang memiliki toksisitas rendah dan *biocompatible*, sehingga aman digunakan sebagai material antibakteri dan dalam aplikasi biomedis (Kumar et al., 2017; Pasaribu & Saragih, 2013).

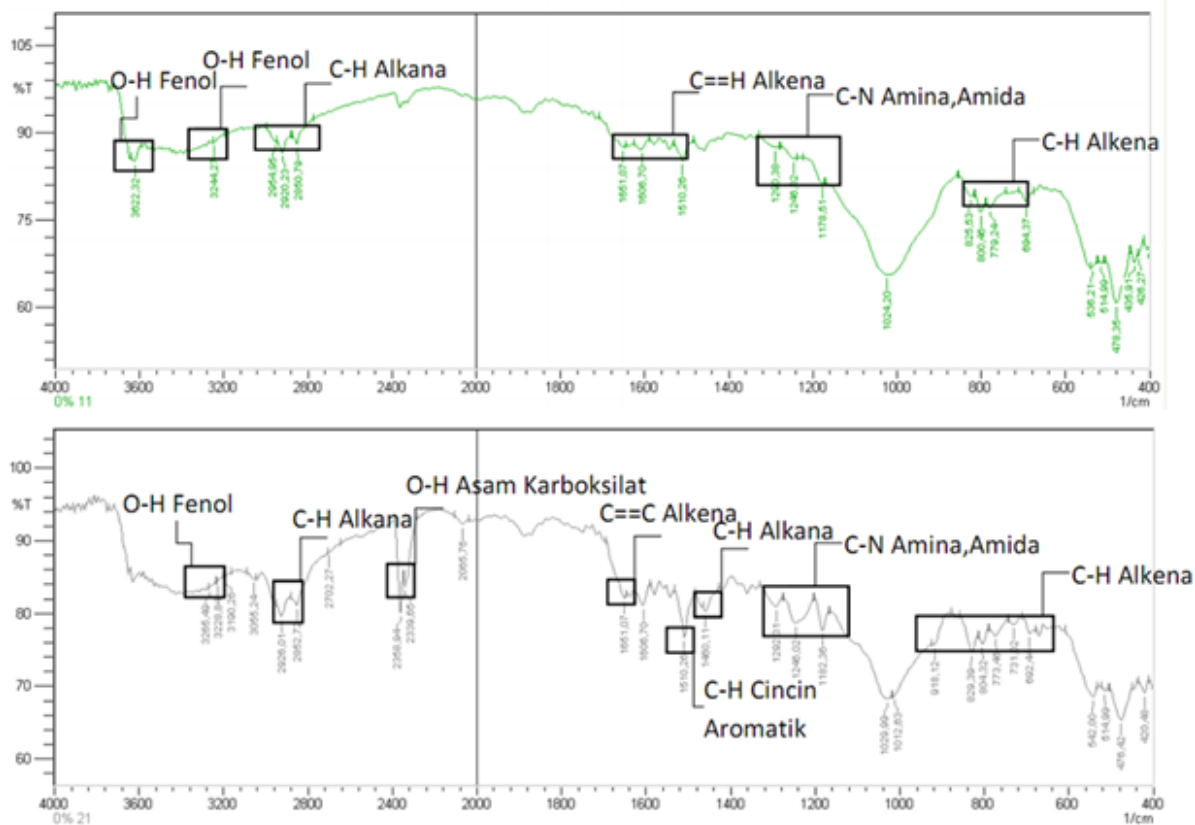
3.2. Pengujian Fourier Transform Infra-Red (FTIR)

Pengujian FTIR dilakukan terhadap material PMC epoksi – ZnO yang telah dibuat. Tabel 1 menunjukkan serapan gelombang dari PMC epoksi – ZnO. Hasil pengujian FTIR dari material PMC epoksi – ZnO 0%; 0,6% dan 0,9% berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.

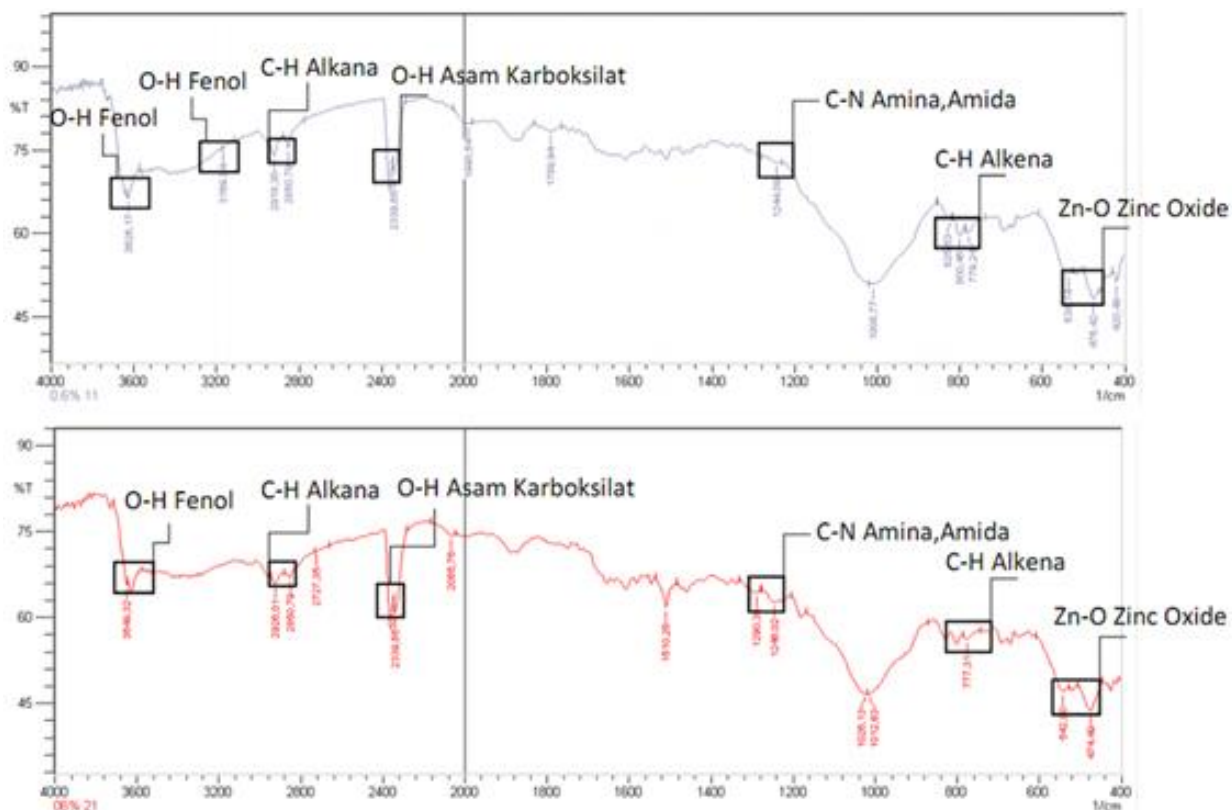
Hasil pengujian FTIR menunjukkan bahwa gugus fungsi Zn-O (*zinc oxide*) terdapat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Hal ini sesuai dengan komposisi dari PMC yang dibuat. Gambar 6 merupakan serapan gelombang dari resin epoksi (PMC epoksi – ZnO 0%), tanpa adanya filler nanopartikel ZnO. Sedangkan Gambar 7 dan 8 merupakan serapan gelombang dari PMC epoksi – ZnO 0,6% dan 0,9%.

Tabel 1. Serapan Gelombang PMC Epoksi-ZnO

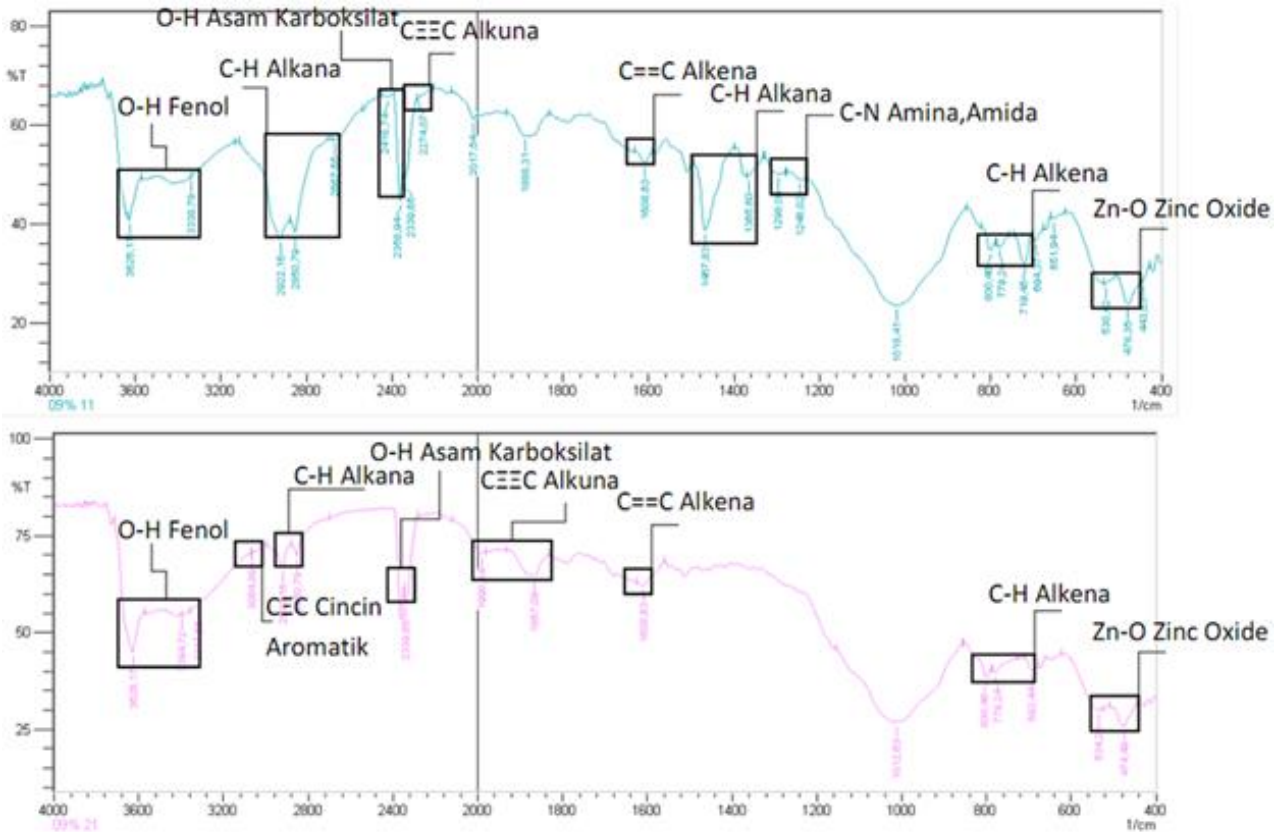
Serapan Gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
450 – 546	Zn – O
694.37 – 825.53	Alkena C – H
1178,51 – 1290.38	Amina C – N
2850.79 – 2954.95	Alkana C – H
3244 – 3622	Fenol O - H



Gambar 6. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)



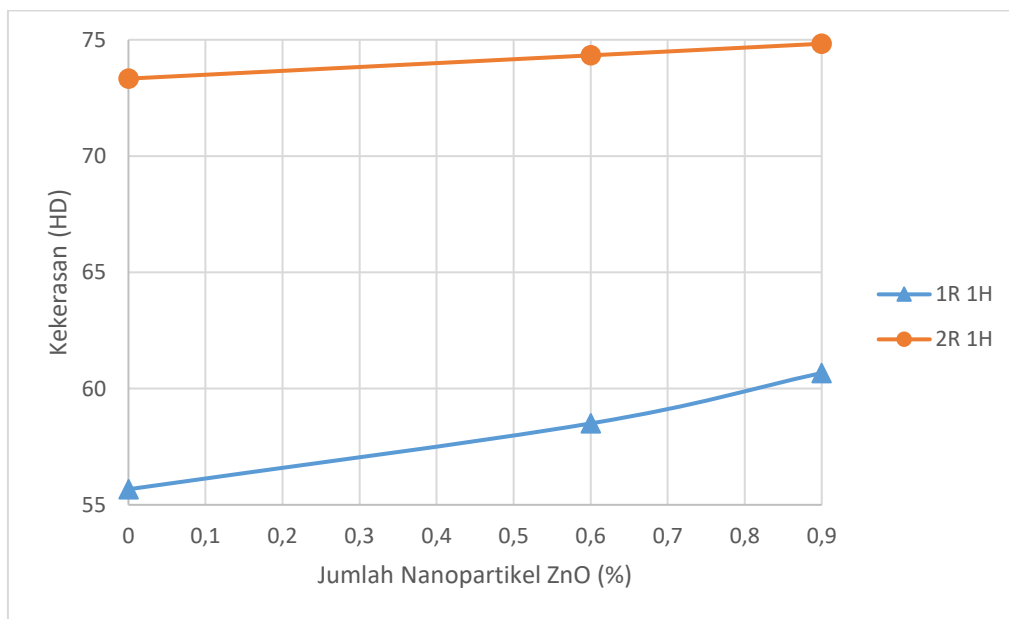
Gambar 7. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0,6% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)



Gambar 8. Hasil Pengujian FTIR dari PMC Epoksi – ZnO 0,9% 1R:1H (atas) dan 2R:1H (bawah)

3.3. Pengujian Kekerasan

Gambar 9 menunjukkan nilai kekerasan dari PMC epoksi-ZnO. Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa nilai kekerasan material PMC epoksi – ZnO meningkat seiring dengan meningkatnya komposisi resin dan persentase nanopartikel ZnO. Hal ini dikarenakan dengan penambahan komposisi resin, maka densitas dari komposit yang terbentuk semakin besar. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh dari material PMC epoksi – ZnO 0,9% 2R:1H senilai 74,82. Sedangkan nilai kekerasan terendah diperoleh dari material PMC epoksi – ZnO 0% 1R:1H.



Gambar 9. Hasil Pengujian Kekerasan

Sebagai bahan perbandingan, dilakukan pengujian kekerasan terhadap gagang sikat gigi bermerk yang dijual di pasaran. Nilai kekerasan dari gagang sikat gigi bermerk ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Kekerasan Sikat Gigi di Pasaran

Sikat Gigi	Nilai Kekerasan (HD)
C	65,83
P	44,00

Seperti terlihat pada Tabel 2, nilai kekerasan PMC epoksi – ZnO lebih besar dibandingkan dengan nilai kekerasan dari sikat gigi yang berada di pasaran. Dapat dikatakan bahwa, nilai kekerasan dari PMC epoksi – ZnO yang dihasilkan sudah cukup baik.

3.4. Pengujian Sifat Antibakteri

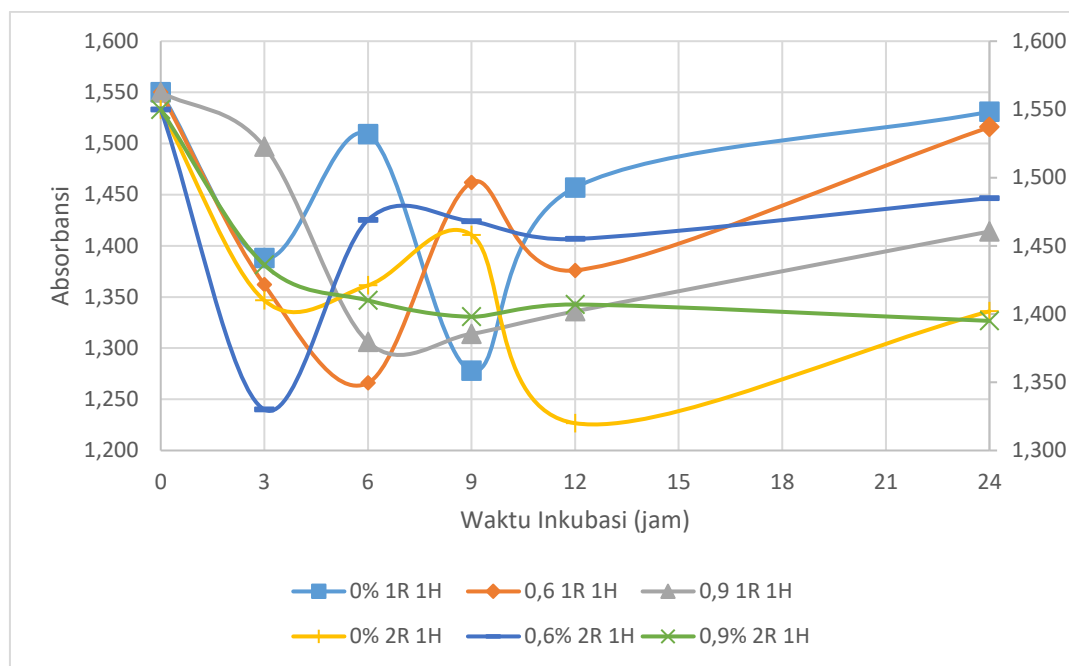
Dalam penelitian ini, sifat antibakteri diuji menggunakan spektrofotometer dengan metode *optical density*. Nilai absorbansi dari medium larutan kaldu (Gambar 3) merupakan nilai absorbansi awal yang menjadi standar pengukuran. Nilai absorbansi awal menunjukkan jumlah bakteri yang ada di dalam medium larutan kaldu sebelum dimasukkan PMC yang berperan sebagai material antibakteri.



Gambar 10. Proses Pengujian Sifat Antibakteri PMC Epoksi – ZnO dalam Medium Larutan Kaldu

Pengujian antibakteri dari material PMC epoksi – ZnO dilakukan dengan mencelupkan material PMC epoksi – ZnO ke dalam medium larutan kaldu, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Proses pengujian ini dilakukan dengan variasi waktu 0 jam, 3 jam, 6 jam, 9 jam, 12 jam dan 24 jam. Dengan dimasukkannya PMC epoksi – ZnO yang berperan sebagai material antibakteri, maka jumlah bakteri yang ada dalam medium larutan kaldu akan berkurang. Hal tersebut dapat terlihat dari nilai absorbansi yang terukur dari medium larutan kaldu setelah dicelupkan material PMC epoksi – ZnO.

Pada Gambar 11, terlihat adanya penurunann nilai absorbansi dari material PMC – epoksi dengan komposisi ZnO 0% 1R:1H dan ZnO 0% 2R:1H. Hal ini menunjukkan bahwa sifat antibakteri dari PMC epoksi - ZnO 0% 2R:1H lebih baik dibandingkan dengan PMC epoksi - ZnO 1R:1H. Peningkatan sifat antibakteri ini disebabkan oleh adanya gugus fungsi O – H dari asam karboksilat yang muncul pada material PMC epoksi - ZnO 0% 2R:1H (Gambar 6). Gugus fungsi O – H inilah yang dimanfaatkan dalam proses deaktivasi dan penguraian mikroorganisme.



Gambar 11. Nilai Absorbansi PMC

Hasil pengukuran nilai absorbansi dari medium larutan kaldu ditunjukkan pada Gambar 11. Pengujian sifat antibakteri dari medium larutan kaldu ini tidak terlihat signifikan perubahannya. Hal ini mungkin terjadi karena waktu pengujian yang tidak terlalu lama. Namun demikian, dari hasil pengujian menggunakan spektrofotometer dengan metode *optical density* dapat dikatakan bahwa sifat antibakteri dari material PMC epoksi – ZnO meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah nanopartikel ZnO.

Namun bukan hanya jumlah nanopartikel yang mempengaruhi sifat antibakteri dari material antibakteri ini. Faktor lainnya yang mempengaruhi sifat antibakteri adalah distribusi nanopartikel ZnO dalam matriks epoksi dan interaksi antarmuka antara ZnO dan matriks epoksi.

Kesimpulan

Berdasarkan data hasil pengujian didapat bahwa dengan penambahan serbuk nanopartikel ZnO sebesar 0%; 0,6% dan 0,9% pada matriks epoksi, maka densitas komposit meningkat, sehingga nilai kekerasan pun meningkat. Sifat antibakteri dari PMC epoksi yang didoping dengan ZnO menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO meningkatkan sifat antibakteri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai penelitian ini. Tidak lupa pula, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan pembuatan artikel ilmiah ini.

Daftar Notasi

- R = resin
- H = *hardener*
- E_B = modulus elastisitas *bending*
- L = panjang *span*
- m = *slope of tangent*
- b = lebar spesimen
- d = tebal spesimen

Daftar Pustaka

- ASTM INTERNATIONAL. (2002). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790. In *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/D0790-10>.
- Azam, A., Ahmed, A. S., Oves, M., Khan, M. S., Habib, S. S., & Memic, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A comparative study. *International*

- Journal of Nanomedicine*, 7, 6003–6009. <https://doi.org/10.2147/IJN.S35347>
- Bawardi, J. T. (2018). *Pembuatan Biofilm Antibakteri Berbahan Nanopartikel ZnO*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). Materials science and engineering. In *John Wiley & Sons, Inc.* (8th ed.). John Wiley and Sons Inc.
- Chavali, M. S., & Nikolova, M. P. (2019). Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Applied Sciences*, 1(6), 607. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0592-3>
- Droval, G., Aranberri, I., Bilbao, A., German, L., Verelst, M., & Dexpert-Ghys, J. (2008). Antimicrobial activity of nanocomposites: Poly(amide) 6 and low density poly(ethylene) filled with zinc oxide. *E-Polymers*, 128. <https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.1467>
- Gibson, G. (2017). Epoxy Resins. In *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition* (pp. 773–797). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00027-X>
- Hrenovic, J., Milenkovic, J., Daneu, N., Kepcija, R. M., & Rajic, N. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles supported onto natural clinoptilolite. *Chemosphere*, 88, 1103–1107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.023>
- HT, I. (2020). *Measuring Biomass in Shake Flasks: Offline OD vs. Online Backscatter Light / EN Blog | INFORS HT*. <https://www.infors-ht.com/fr/blog/measuring-biomass-in-shake-flasks-offline-od-vs-online-backscatter-light/>
- Jones, N., Ray, B., Ranjit, K. T., & Manna, A. C. (2007). *Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms*. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.01012.x>
- Kumar, R., Umar, A., Kumar, G., & Nalwa, H. S. (2017). Antimicrobial properties of ZnO nanomaterials: A review. In *Ceramics International* (Vol. 43, Issue 5, pp. 3940–3961). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.062>
- Padmavathy, N., & Vijayaraghavan, R. (2008). Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles - An antimicrobial study. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/035004>
- Pasaribu, K. F., & Saragih, H. (2013). Aktivitas Antimikrobia Nanopartikel Zinc Oxide (ZnO) pada Strain Staphylococcus Aureus. In *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2013* (Issue Desember).
- Prasanna, S. R. V. S., Balaji, K., Pandey, S., & Rana, S. (2019). Metal Oxide Based Nanomaterials and Their Polymer Nanocomposites. In *Nanomaterials and Polymer Nanocomposites* (pp. 123–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814615-6.00004-7>
- Wu, C., Yan, Y., Wang, Y., Sun, P., & Qi, R. (2020). Antibacterial epoxy composites with addition of natural *Artemisia annua* waste. *E-Polymers*, 20(1), 262–271. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0029>

Sistem Pengaturan Pendingin Ruangan dengan Menggunakan *Thermoelectric* dan *Blower Motor Direct Current*

Zul Fakhri¹, Ahmad Daelami¹, Bayudin¹, dan Atik Charisma¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

zulfakhri18@gmail.com, ahmad.daelami@lecture.unjani.ac.id, bayudinn@gmail.com,

atik.charisma@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Peningkatan suhu berpengaruh terhadap kenyamanan hunian sehingga memerlukan alat bantu pengkondisian ruangan supaya suhu tetap stabil dan nyaman. Alat bantu pendingin ruangan yang umum digunakan masyarakat kini menggunakan zat kurang ramah lingkungan karena dapat merusak lapisan ozon serta mahalnya biaya operasional dan perawatan. Teknologi pendingin dan penyejuk ruangan menjadi hal yang sangat penting saat ini. Berbagai teknologi pun telah ada di pasaran untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Pada penelitian ini menguraikan tentang perancangan dan realisasi sebuah sistem pengaturan pendingin ruangan menggunakan *thermoelectric* dan *blower motor direct current*. Sistem ini terdiri dari *peltier*, sensor suhu DS18B20 dan *blower motor* DC serta mikrokontroler Arduino yang diinstalasi metode pengendalian PID (*Proportional Integral Derivative*). Hasil pengujian suhu *blower* tanpa *peltier* terukur dengan suhu rata-rata 25,65°C sedangkan dengan *peltier* 22,27°C. Hasil pengujian menunjukkan pengendali PID dengan parameter $K_p = 20$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$ dapat menjaga nilai setpoint suhu 17°C.

Kata kunci: *Peltier*, *PID*, *Blower*

Abstract

The increase in temperature affects the comfort of the dwelling, especially the bedroom area, so it requires a room conditioning tool so that the temperature remains stable and comfortable. Air conditioning tools that are commonly used by the public are now using less environmentally friendly substances because they can damage the ozone layer and are expensive to operate and maintain. Cooling and air conditioning technology is becoming very important at this time. Various technologies are already on the market to meet people's needs. This research describes the design and realization of an air conditioning control system using a thermoelectric and direct current blower motor. This system consists of a Peltier, a DS18B20 temperature sensor and a DC blower motor using PID control. In the test the blower temperature without peltier is measured with an average temperature of 25,65°C while with peltier it is 22,27°C. The most optimal PID parameters using the trial and error method are $K_p = 20$, $K_i = 2$, and $K_d = 20$ with a set point of 17°C.

Keywords: Peltier, PID, Blower

1. Pendahuluan

Peningkatan suhu berpengaruh terhadap kenyamanan hunian sehingga alat bantu pengkondisi ruangan diperlukan untuk menjaga agar suhu berada dalam kondisi yang diinginkan. Pendingin ruangan selain kipas angin umumnya pengkondisi udara (*air conditioner*) dengan daya 800 – 900 Watt. Pendingin ruangan menjadi tidak efektif apabila suhu yang terlalu dingin dan tidak dimatikan setelah selesai menggunakan ruangan yang memiliki AC sebagai pendingin ruangan. Penelitian terdahulu tentang sistem pengontrolan suhu pada AC menggunakan mikrokontroler telah berhasil menaikkan dan menurunkan suhu pendingin ruangan secara otomatis (Bangala et al., 2018). Penelitian lainnya berupa sistem pengontrolan AC berbasis Arduino UNO, sensor *Passive Infrared Receiver (PIR)*, *Real Time Clock (RTC)* (Fetra, 2020) yang diatur ketika tidak ada orang di ruangan pada pukul 18.00 WIB maka AC otomatis akan mati. Apabila di atas jam 18.00 WIB masih terdeteksi ada orang di ruangan tersebut maka AC akan tetap menyala.

Alat bantu pendingin ruangan yang umum digunakan masyarakat kini menggunakan zat kurang ramah lingkungan karena dapat merusak lapisan ozon serta mahalnya biaya operasional dan perawatan. Dampak kerusakan lingkungan serta menekan biaya operasional dan perawatan dapat diminimalisir dengan sebuah alat pendingin baru yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis (J. Victor Tuapetel, A. Faishal Ramadhan, 2019). Pendingin ruangan dengan teknologi kompresi uap memiliki *coefficient of performance (COP)* tinggi dan harga yang lebih murah (Tangwe, SL. Simon, M. Meyer, 2017). Teknologi kompresi uap menggunakan gas pendingin tipe R134a dan R600a untuk menyerap panas dalam lemari pendingin (Gökçek M, 2017). Gas pendingin ini ternyata dapat mengurangi lapisan ozon. Oleh karena itu (Indrawan, 2019) merancang sebuah pendingin termoelektrik pada sistem lemari pendingin berbasis kontroler *Proportional Integral Derivative (PID)* dengan *steady state error* 2,86%.

Info Makalah:

Dikirim : 10-10-21;
Revisi 1 : 12-13-21;
Revisi 2 : 03-02-22;
Revisi 3 : 03-07-22;
Diterima : 05-11-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 813-2831-1218
e-mail : zulfakhri18@gmail.com

Teknologi pendingin dan penyejuk ruangan menjadi hal yang sangat penting saat ini. Berbagai teknologi pun telah ada di pasaran untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. *Air cooler* salah satu pilihan pendingin ruangan dengan memanfaatkan teknologi termoelektrik peltier. *Air cooler* yang telah banyak beredar di pasaran juga sudah menjadi alternatif untuk pendingin ruangan dengan harga di atas 1 juta rupiah serta ukuran yang besar. *Air cooler* ini tidak hanya mendinginkan ruangan namun juga menyejukan ruangan dengan sistem yang hemat energi dan ramah lingkungan. Rancang bangun sistem penyejuk ruangan menggunakan termoelektrik *peltier* TEC 12706 (Rohito et al., 2019) menghasilkan sebuah *air cooler* mini yang efisien, ramah lingkungan serta hemat energi.

AC yang umumnya digunakan oleh masyarakat saat ini memakai Freon. Freon memiliki keunggulan berupa kondisi stabil dan titik beku yang rendah (L. Ma, L. Shang, D. Zhong, 2017) namun dapat merusak lapisan ozon (D. Ryvlin, M. Girschikofsky, D. Schollmeyer, R. Hellmann, 2018). Penelitian oleh Akbar Sujiwa dkk (Sujiwa & Nurochman, 2019) tentang penggunaan *waterblock* menyimpulkan bahwa penggunaan *waterblock* dapat menambah performansi pendingin termoelektrik. Sistem kendali otomatis dapat mempermudah dan mempercepat kegiatan manusia (Firdaus & Zulfikar, 2016). Selain itu dengan kendali otomatis dapat mengurangi *human error*. Oleh karena itu, pada penelitian ini membuat sistem pengaturan pendingin ruangan dengan menggunakan *thermoelectric* dan *blower motor direct current* dengan metode kendali PID.

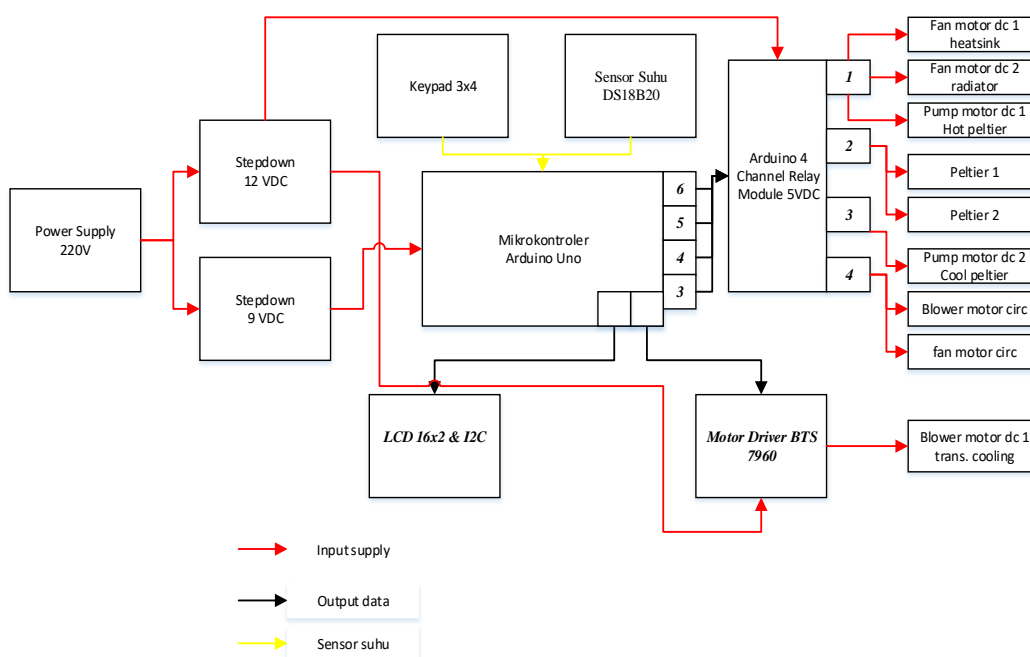
Peltier atau termoelektrik seperti di Gambar 1 dimanfaatkan secara maksimal agar mendapatkan suhu dingin dengan mendesain antara *heatsink* dan yang didinginkan *fan* untuk melepas sisi panas, serta regulator *Aluminium water block* yang disirkulasikan untuk memaksimalkan sisi dingin menuju ruangan. *Heatsink* sangat cepat menyerap panas disirkulasikan menuju regulator untuk lebih menurunkan suhu agar cairan menjadi dingin. Kunci dari sistem pendingin adalah perpindahan kalor yang ditangani dengan cepat. Peltier ditempelkan dengan menggunakan lem konduktif pada *heatsink* dan *Aluminium water block* dengan bentuk seperti Gambar. Peltier ditemukan pertama kali pada tahun 1834 oleh Jean Peltier, sehingga hasil penemuannya ini sering disebut “Pendingin Peltier” (Samsugi & Suwantoro, 2018).



Gambar 1. Peltier (Samsugi & Suwantoro, 2018)

2. Metode

Diagram skematik sistem yang dibangun dalam penelitian ini diberikan dalam Gambar 2.

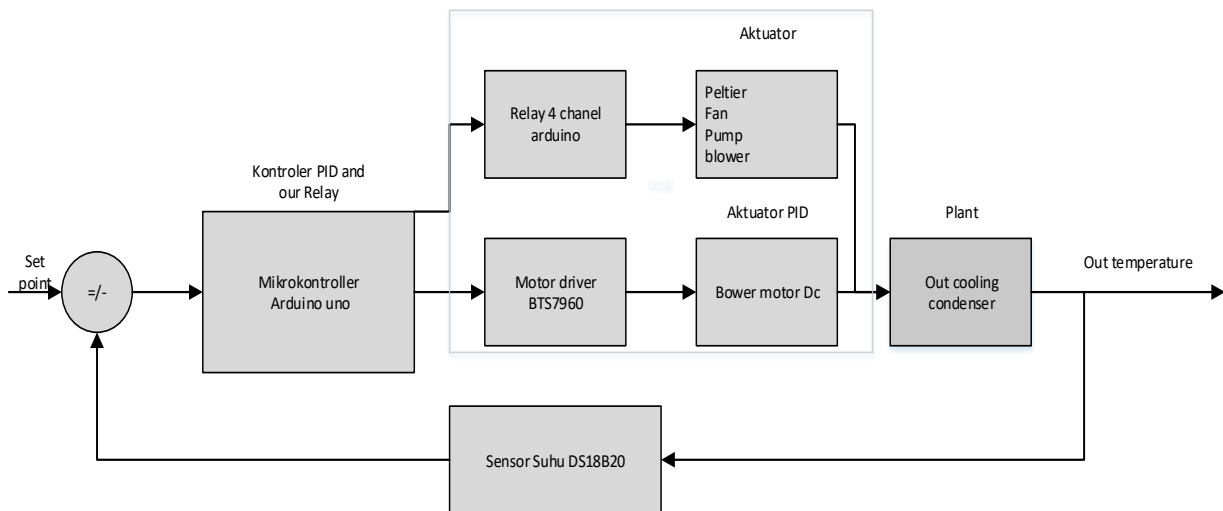


Gambar 2. Diagram Skematik Sistem

Pada Gambar 2 menggambarkan konsep dari unit perangkat keras yang digunakan pada prinsip kerja alat yang direncanakan serta spesifikasi komponen dan modul yang akan dipakai dalam membuat *prototype room control temperature*. Prinsip kerja dari *prototype* ini berdasarkan *set point* dapat menyalakan *blower motor* DC, pompa *motor* DC dan *peltier* secara otomatis menggunakan *module relay*, dilanjutkan dengan pendistribusian udara dingin melalui *blower motor* DC yang dikontrol dengan sistem PID yang bergerak dari cepat ke lambat berdasarkan suhu yang telah diinputkan dengan menekan keypad 3×4 dan juga memberikan informasi pada LCD 16×2 I2C display besaran suhu yang terdeteksi secara *realtime*.

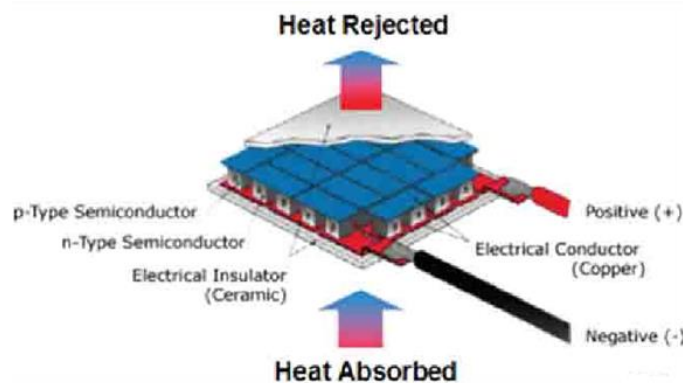
Berdasarkan Gambar 3 fungsi dari masing masing blok diagram dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Mikrokontroler Arduino Uno berfungsi sebagai pengontrol sistem dimana terdapat algoritma yang dibuat untuk mengatur *output*: nyala *relay 4 channel* dan motor *driver* untuk aktuator.
2. *Relay 4 chanel* arduino, *relay 1*: aktuator sisi panas (pompa *motor* DC, *fan motor* DC radiator, *fan motor* DC *heatsink*), *relay 2* : aktuator termoelektrik (*peltier1* dan *peltier 2*), *relay 3* aktuator sisi dingin (pompa motor DC), *relay 4*: aktuator tambahan (*blower motor* DC dan *fan motor* DC)
3. Motor *driver* BTS7960 merupakan pengontrol *blower motor* DC memberi *speed low, medium, high* mengikuti *set point*.
4. Aktuator terdiri dari 2 buah *peltier*, 3 buah *fan*, 2 buah *pump*, dan 1 *blower motor* DC
5. *Actuator PID* berupa *blower motor* DC
6. *Plant Out cooling condenser* ialah udara dingin yang dihasilkan untuk dianalisis
7. Sensor suhu DS18B20 umpan balik yang menjadi acuan pengontrolan agar suhu keluaran stabil.



Gambar 3. Diagram Blok Kendali

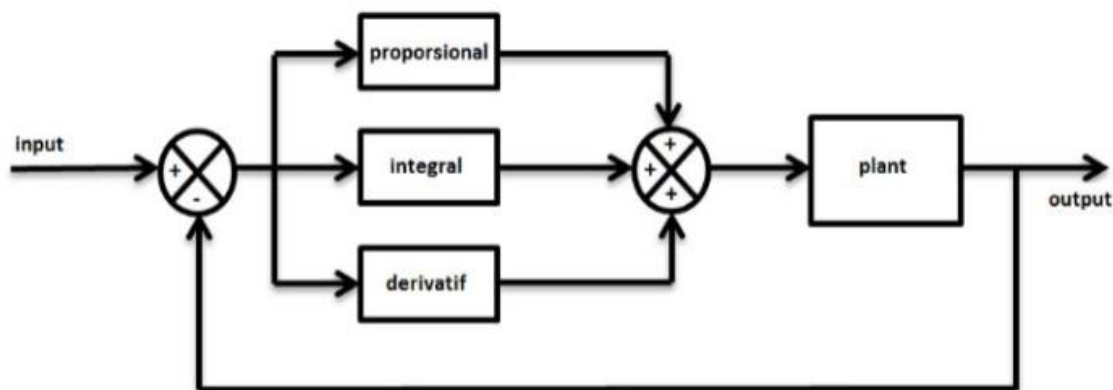
Termoelektrik yang menjadi alternatif teknologi pendingin pada dasarnya menerapkan konsep konversi energi. Termoelektrik mengkonversi energi panas menjadi listrik atau sebaliknya, bahkan bisa dari energi listrik menjadi energi dingin menggunakan bahan semikonduktor. Termoelektrik terdiri dari elemen tipe-P dan tipe-N yaitu material kekurangan elektron dan kelebihan elektron seperti tampak pada Gambar 4. Penelitian ini menggunakan kontrol *Proportional Integral Derivative (PID)* untuk mengatur kecepatan *blower motor* DC. PID suatu sistem kontroler umpan balik pada sistem instrumentasi agar memperoleh hasil yang presisi (Ilahy et al., 2021).



Gambar 4. Termoelektrik (J. Victor Tuapetel , A. Faishal Ramadhan, 2019)

Diagram blok sistem kendali dengan tipe pengendali PID diberikan dalam Gambar 5. Pengendali PID berfungsi untuk mempercepat *set point*, mempercepat respon waktu menghilangkan osilasi (Rosalina et al., 2017). Dengan menandai $e(t)$ adalah sinyal *error* dan $u(t)$ berupa sinyal keluaran dari pengendali, hubungan antara sinyal $e(t)$ dan $u(t)$ diberikan dalam persamaan (1). (Wardhana DW, Wahyudi A, 2016).

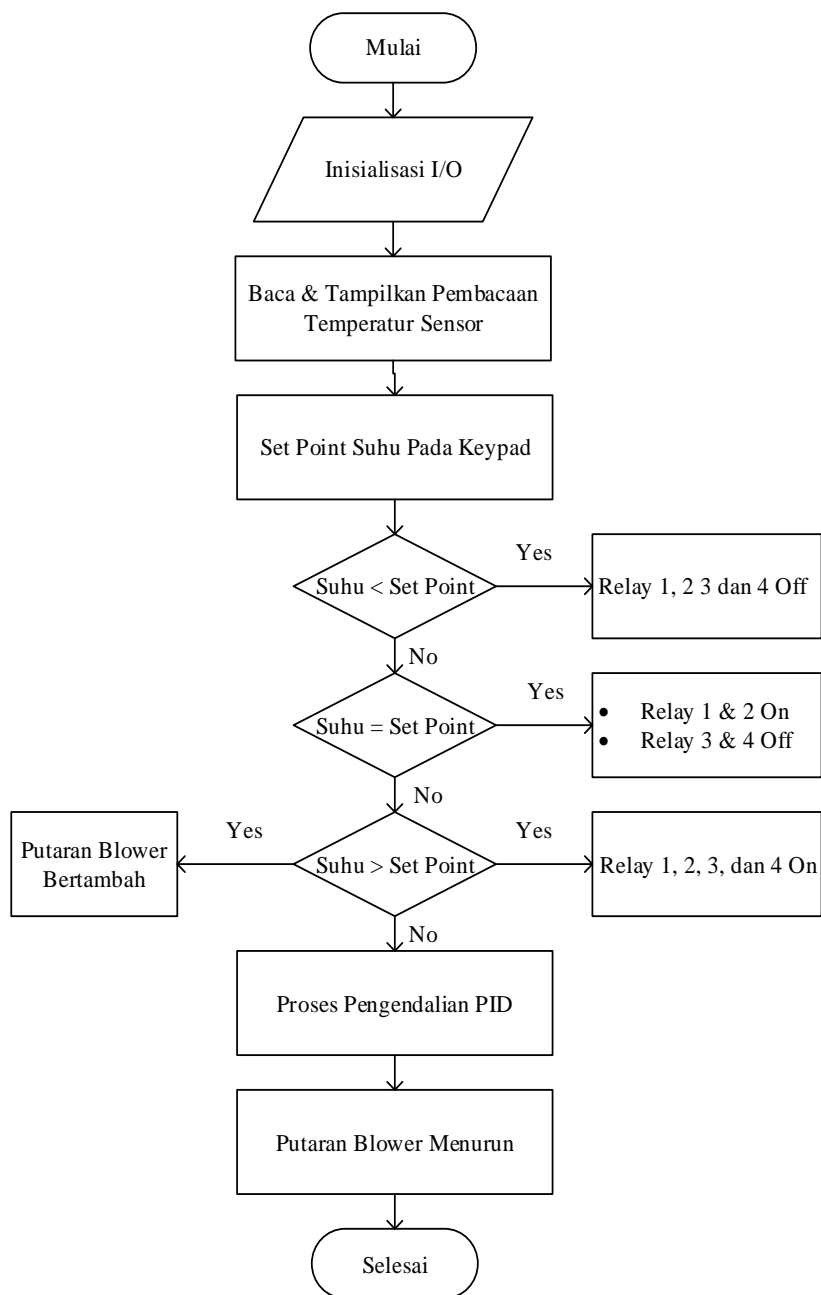
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$



Gambar 5. Diagram Blok PID (Ogata, 1991)

Berdasarkan persamaan (1) nilai keluaran dari bobot pengontrolan $u(t)$ tergantung pada variabel nilai penguatan kontrol *proportional* (K_p), penguatan kontrol *integral* (K_i), dan penguatan kontrol *derivative* (K_d) yang masing-masing dikalikan nilai *error* (e) yang berjalan secara terus menerus dalam jeda waktu (t) (Wardhana DW, Wahyudi A, 2016). Bagan dengan simbol-simbol tertentu yang menggambarkan urutan proses secara mendetail dan hubungan antara suatu proses (instruksi) dengan proses lainnya dalam suatu program. *Flowchart* berisi dekripsi urutan prosedur-prosedur yang terkombinasi yang membentuk sebuah sistem. Pada *flowchart* Gambar 6 program dimulai ketika power Arduino Uno dinyalakan maka logika proses akan dimulai diawali dengan inisialisasi I/O yaitu mengakses dan memproses *input/output* yang terpasang pada sistem (*keypad*, sensor, indikator, *relay*, dan display). Pada *sketch* istilah untuk proses inisialisasi I/O terdapat pada bagian *sketch* bernama "*void setup*". Proses logika selanjutnya adalah membaca dan menampilkan hasil pembacaan sensor suhu pada LED 16×2 I2C.

Sistem yang dibuat merupakan sistem tertutup sehingga didalamnya terdapat sebuah logika "*DECISION*" yang merupakan logika pilihan berdasarkan nilai pembacaan suhu yang terdeteksi. Pada logika ini nilai pembacaan sensor suhu menjadi acuan, dimana Pada Gambar 6 dapat dijelaskan ketika *power* dihidupkan akan menyalakan adapter 5 VDC (Arduino) *power supply* 12 vdc (*actuator*). Tegangan dari Adaptor 5V akan menghidupkan Arduino Uno untuk memulai program inisialisasi I/O lalu akan mengontrol suhu yang akan ditampilkan pada LCD 16×2 I2C. Setelah inisialisasi ditampilkan, *setpoint* dimasukan sesuai yang diinginkan dengan menekan keypad 3×4 sebagai media masukan. *Relay 4 channel* yang menjadi saklar dari *actuator* akan beroperasi, sistem PID pengatur kecepatan *blower motor* DC mengikuti kondisi dari sistem *looping* yang dibuat. Jika suhu kurang dari *setpoint* yang diinputkan maka *Relay 1, Relay 2, Relay 3, dan Relay 4 OFF*, *blower motor* DC diatur kecepatannya dengan motor *driver* posisi *speed low*, lalu hasil pembacaan akan di tampilkan pada LCD. Jika suhu sama dengan *setpoint* yang diinputkan maka *Relay 1 dan Relay 2 ON* sedang *Relay 3 dan Relay 4 OFF*, *blower motor* DC diatur kecepatannya dengan motor *driver* posisi *speed medium*, lalu hasil pembacaan akan ditampilkan pada LCD. Jika suhu lebih dari *setpoint* yang diinputkan maka *Relay 1, Relay 2, Relay 3, dan Relay 4 ON*, *blower motor* DC diatur kecepatannya dengan motor *driver* posisi *speed high ke medium* untuk menstabilkan suhu diruangan. Selain mengontrol kondisi *actuator* termoelektrik dan *actuator* transfer PID, secara bersamaan juga menampilkan indikator dan display informasi status *Fan* dan *peltier* serta pembacaan suhu di LCD display. Sistem ini akan terus berjalan sebagai sistem *Closed Loop* hingga sistem dimatikan secara manual.



Gambar 6. FlowChart

Alat dengan ukuran panjang 40 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 20 cm dibuat dengan beberapa tahap dimulai dari pembuatan rangka utama meliputi badan alat, selanjutnya pembuatan konstruksi sistem pengatur sisi panas dan dingin peltier, lalu pemipaan, diakhiri penempatan panel untuk tempat pengontrolan.

1. Rangka Utama (badan Alat)

Bahan pembentuk alat didominasi oleh akrilik yang didesain secara *portable* agar bisa di gunakan dimana saja. Bahan pendukung berupa sterofoam, k flex dan aluminium foil untuk melapisi bagian dalam dipergunakan untuk menahan suhu dingin dalam ruangan.

2. Penempatan *peltier*

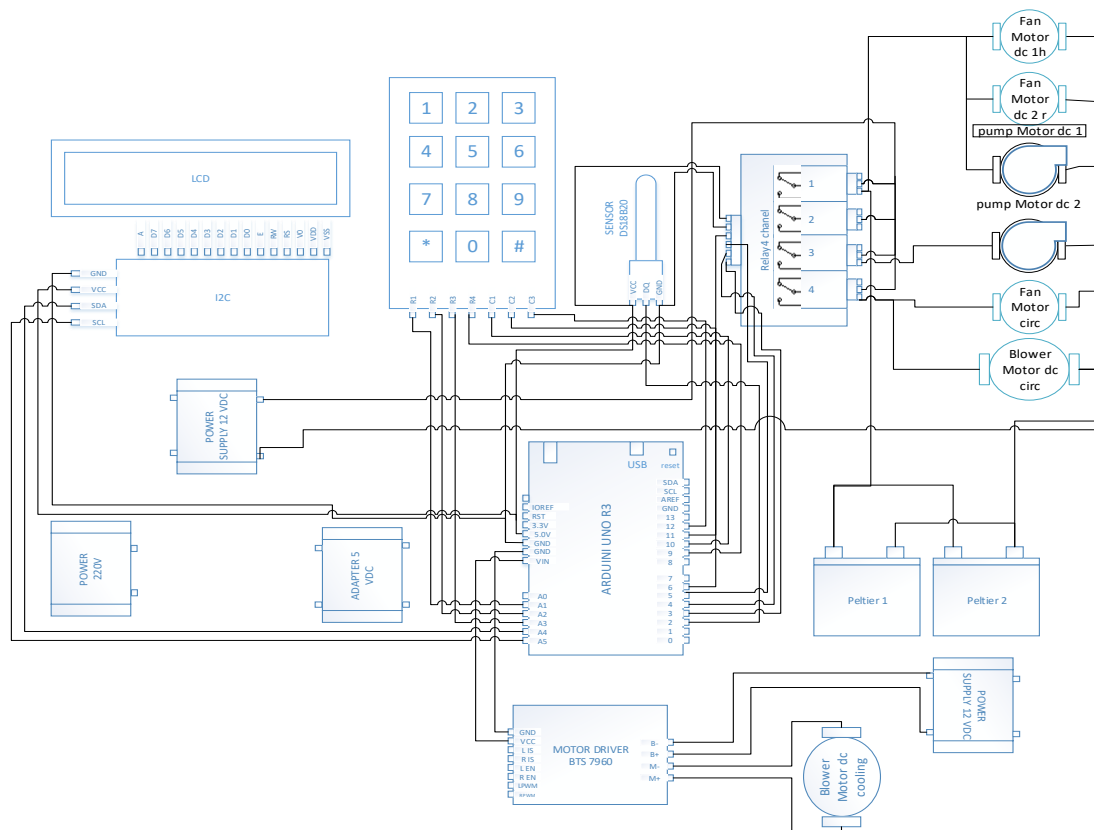
3. Pemipaan sistem dan sirkulasi

Memaksimalkan pendinginan menggunakan sistem *liquid* berupa glikol supaya pendinginan menjadi maksimal. *Liquid* ini dapat menyerap kalor dengan titik lebur: $-12,9^{\circ}\text{C}$ dan titik didih: 197°C . Pemanfaatannya disalurkan melalui pipa plastik untuk menyerap suhu dari sisi panas dan sisi dingin *peltier*. Pipa ini menjadi alat penyalur *liquid* ini melewati bak penampungan, *pompa motor* DC, regulator, aluminium *water block*, terus bersirkulasi sampai suhu stabil.

4. Penempatan panel dan kabel

Penempatan panel untuk Arduino uno R3 dan alat elektronik kontrol lainnya ditempatkan di bagian samping Alat yang sangat aman dan mudah dari segi perbaikan menggunakan box atau panel tertutup yang aman dari cipratan air atau sisa kondensasi (embun hasil pendinginan).

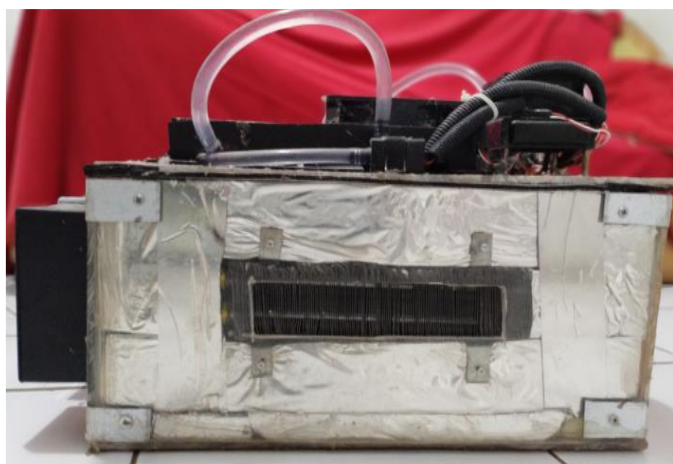
Setelah melakukan percobaan terhadap masing-masing rangkaian secara terbatas pada *breadboard* (papan uji coba rangkaian) maka dibuat rangkaian keseluruhan pada alat mini AC *portable*. Berikut Gambar 7 skematik rangkaian keseluruhan.



Gambar 7. Skematik Rangkaian Keseluruhan.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan skematik pada Gambar 7, maka dibuat sebuah alat pengatur suhu menggunakan metode kendali PID.



Gambar 8. Hasil Perakitan Tampak Depan



Gambar 9. Hasil Perakitan Tampak Samping Kanan dan Kiri



Gambar 10. Hasil Perakitan Tampak Atas

Pada Gambar 8, 9, dan 10 hasil perakitan komponen-komponen yang terdiri dari *peltier*, sensor suhu DS18B20 dan *blower motor*. Langkah awal pengujian alat ini adalah menganalisis kinerja sensor suhu DS18B20 dengan membandingkan hasil pembacaan suhu terhadap thermometer digital yang telah dikalibrasi. Berikut Tabel 1 merupakan hasil pengujian sensor DS18B20 dengan selisih rata-rata sebesar 0,16°C.

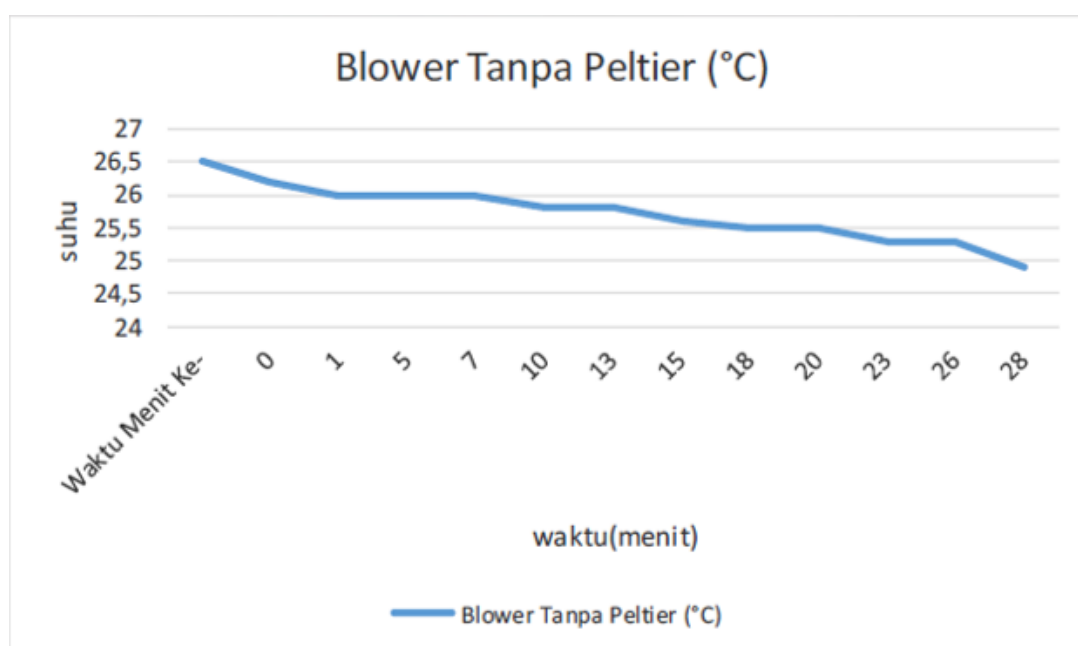
Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor DS18B20

No.	Termometer Digital (°C)	DS18B20 (°C)	Selisih
1	26,2	26	0,2
2	26,4	26,2	0,2
3	30,3	30,6	0,2
4	35,6	35,5	0,2
5	46,5	46,5	0
6	57,2	57,1	0,2
7	63,5	63,7	0,2
8	73,9	73,9	0
9	79,8	79,7	0,2
10	85,5	85,1	0,4
Rata-rata			0,16

Pengujian selanjutnya pengukuran suhu hembusan *blower* tanpa *peltier* dan dengan menggunakan *peltier* pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran Suhu Hembusan Blower Tanpa *Peltier*

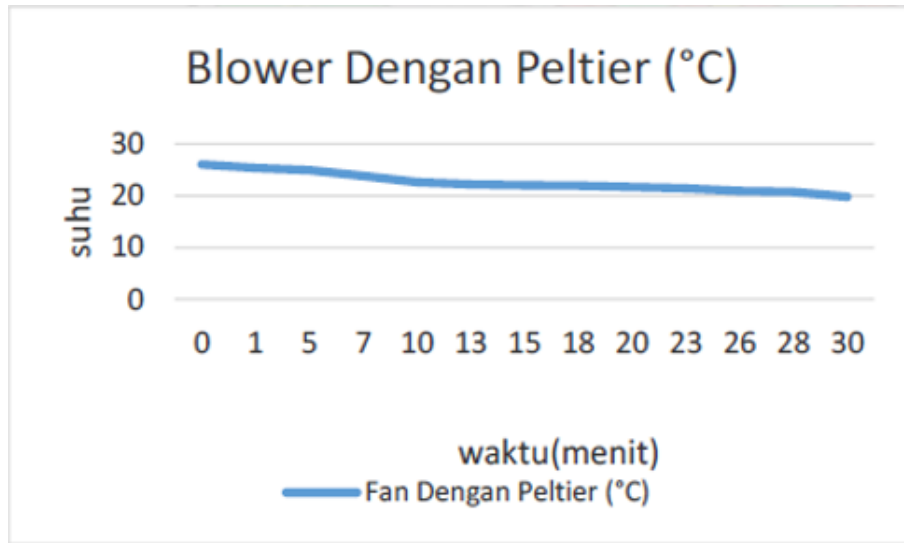
No.	Menit ke	Suhu
1	0	26,5
2	1	26,2
3	5	26
4	7	26
5	10	26
6	13	25,8
7	15	25,8
8	18	25,6
9	20	25,5
10	23	25,5
11	26	25,3
12	28	25,3
13	30	24,9



Gambar 11. Suhu Hembusan *Blower* Tanpa *Peltier*

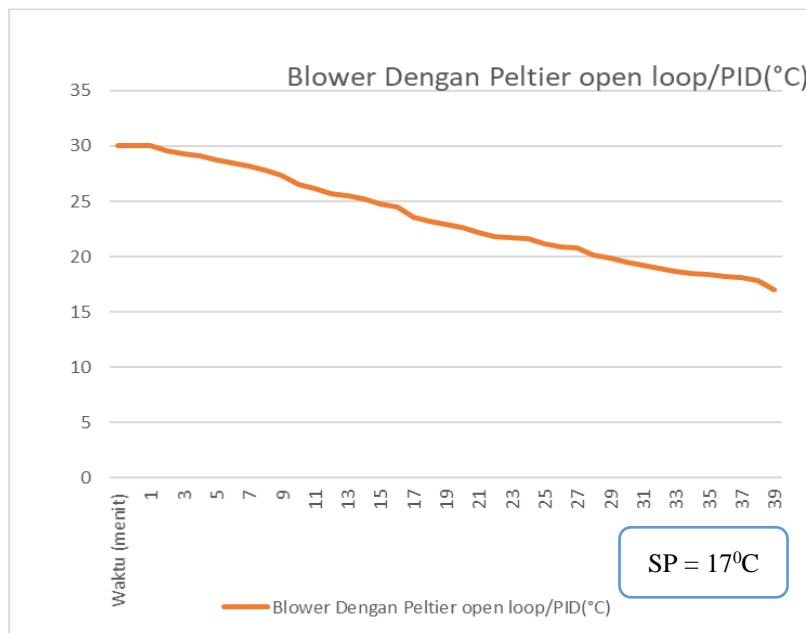
Tabel 3. Pengukuran Suhu Hembusan *Blower* Dengan *Peltier*

Waktu (menit)	Suhu (°C)
0	26
1	25,3
5	24,9
7	23,8
10	22,6
13	22,2
15	22
18	21,9
20	21,7
23	21,4
26	20,9
28	20,7
30	19,8



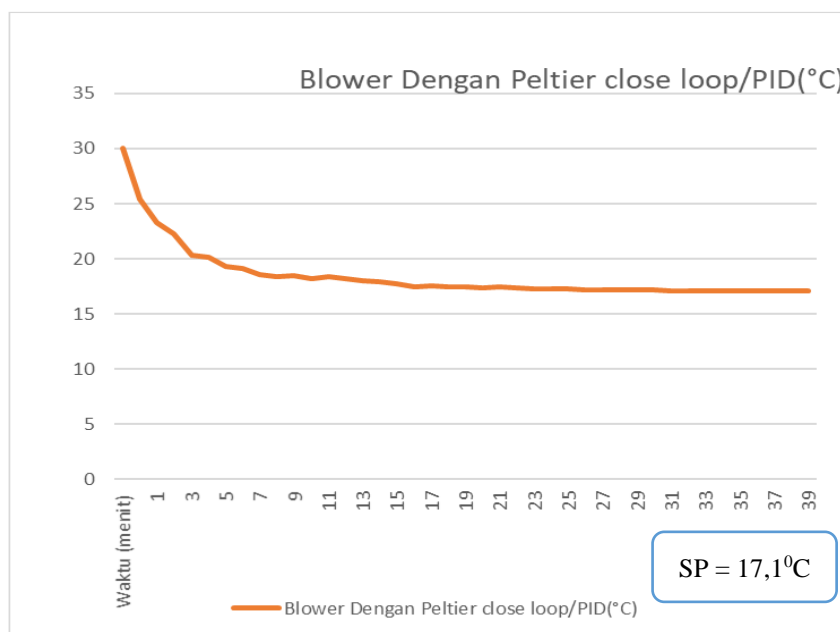
Gambar 12. Suhu Hembusan *Blower* dengan *Peltier*

Berdasarkan grafik di Gambar 11 dan 12 rata-rata suhu hembusan *blower* tanpa *peltier* sebesar $25,65^{\circ}\text{C}$ sedangkan dengan *peltier* lebih kecil yakni $22,27^{\circ}\text{C}$. Hal ini memperlihatkan bahwa dengan adanya *peltier* mempengaruhi suhu *blower* menjadi lebih rendah. Sebelum melakukan proses pengontrolan *blower motor* DC dijalankan tanpa kontrol terlebih dahulu atau *open loop* dengan *set point* 17°C , dengan pembatasan waktu 30 menit.



Gambar 13. Grafik Penurunan Suhu *Blower Motor* DC *Open Loop*

Percobaan dilakukan dengan menerapkan metode *trial and error* di Gambar 13 dan 14, dilakukan lebih dari 10 kali percobaan. Hasil yang ditampilkan merupakan parameter dari 10 percobaan yang mendekati nilai yang relevan. Setelah mendapatkan penalaan parameter PID yang paling optimal dengan menggunakan metode *trial and error* yaitu $K_p = 20$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$, selanjutnya dilakukan pengujian respon sistem terhadap keluaran *blower motor* yaitu suhu yang dihitung oleh sensor yang menjadi *feedback* sampai suhu mencapai *set point* 17°C .



Gambar 14. Grafik Penurunan Suhu *Blower Motor DC Closed Loop*

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini bahwa peltier dan blower dengan kendali *PID* dapat mendinginkan suhu dengan rata-rata sebesar $22,7^{\circ}\text{C}$. Parameter *PID* yang paling optimal dengan menggunakan metode *trial and error* yaitu $K_p = 20$, $K_i = 2$, dan $K_d = 20$ dengan set point 17°C . Dengan demikian, suhu blower motor lebih dingin menggunakan peltier.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai penelitian ini dalam Skema Penelitian Kompetitif Tahun Anggaran 2021.

Daftar Notasi

K_p = Konstanta pengendali tipe proporsional

K_i = Konstanta integral

K_d = Konstanta derivatif

Daftar Pustaka

- Bangala, A. L., Rompis, L., Sanger, J. B., Studi, P., Elektro, T., Teknik, F., Studi, P., Informatika, T., Teknik, F., Katolik, U., & Salle, D. La. (2018). Perancangan Sistem Otomasi Suhu Berbasis Mikrokontroler. *JURNAL REALTECH*, 14(1), 1–7.
- D. Ryvlin, M. Girschikofsky, D. Schollmeyer, R. Hellmann, and S. R. W. (2018). Methyl-Substituted α -Cyclodextrin as Affinity Material for Storage, Separation, and Detection of Trichlorofluoromethane. *Glob. Challenges*, 2(8).
- Fetra, R. (2020). *Sistem Otomasi Penyalaan Lampu dan AC (Air Conditioner) pada Ruang Dosen Berbasis Arduino UNO*. 06(01), 145–152.
- Firdaus, R., & Zulfikar, W. (2016). Pengontrol Suhu Ruangan menggunakan Metode PID Room Temperature Controller uses the PID. *Open Journal System UNIKOM*, 4(2), 1–12.
- Gökçek M, Ş. F. E. (2017). Performance investi-gation of minichannel water cooledthermoelectric refrigerator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 54–62.
- Ilahy, M. T. W., Singgih, H., & Sungkono, S. (2021). Implementasi Pengontrol Suhu dan Kelembaban Menggunakan Metode PID Pada Proses Pematangan Keju. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, 6(3), 48. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v6i3.169>
- Indrawan, W. S. (2019). Sistem Pendingin Menggunakan Thermo-Electric Cooler Dengan Kontroler Proportional-Integralderivative. *Berkala Fisika*, 22(2), 68–76.
- J. Victor Tuapetel , A. Faishal Ramadhan, M. K. R. (2019). Rancang Bangun Sistem Pendingin Sekunder Untuk Kabin Mobil Dengan Memanfaatkan Thermoelektrik (TEC). *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 3(1), 18. <https://doi.org/10.31543/jtm.v3i1.244>
- L. Ma, L. Shang, D. Zhong, and Z. J. (2017). Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon charged

- with hydrocarbon and Freon refrigerants. *Appl. Energy*, 207, 665–673.
- Ogata, K. (1991). *Teknik Kontrol Automatik : Sistem Pengaturan* (4th ed.). Erlangga.
- Rohito, K. B., Dantes, K. R., & Nugraha, I. N. P. (2019). Rancang Bangun Air Cooler Dengan Menggunakan Modul Termoelektrik Peltier Type Tec-12706. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 7(3), 122. <https://doi.org/10.23887/jptm.v7i3.26516>
- Rosalina, Qosim, I., & Mujirudin, M. (2017). Analisis Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative). *Seminar Nasional TEKNOKA*, 2(2502–8782), 89–94.
- Samsugi, S., & Suwanto, A. (2018). Pemanfaatan Peltier dan Heater Sebagai Alat Pengontrol Suhu Air Pada Bak Penetasan Telur Ikan Gurame. *Conference on Information Technology*, 295–299.
- Sujiwa, A., & Nurochman, M. A. (2019). Analisa Suhu Pendinginan Termoelektrik Tipe TEC-12706 Dengan Variasi Metode Pendinginan Sisi Panas. *SinarFe7*, 2(1), 425–429. [https://ejournal.fortei7.org/index.php/SinarFe7/article/view/85%0Ahttp://files/224/Sujiwa and Nurochman - 2019 - Analisa Suhu Pendinginan Termoelektrik Tipe TEC-12.pdf%0Ahttp://files/225/85.html](https://ejournal.fortei7.org/index.php/SinarFe7/article/view/85%0Ahttp://files/224/Sujiwa%20and%20Nurochman%20-%202019%20-%20Analisa%20Suhu%20Pendinginan%20Termoelektrik%20Tipe%20TEC-12.pdf%0Ahttp://files/225/85.html)
- Tangwe, S. L., Simon, M., Meyer, E. (2017). Prediction of coefficient of performance and simulation design of an air-source heat pump water heater. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 15(3), 378–394.
- Wardhana DW, Wahyudi A, N. H. (2016). Perancangan sistem kontrol PID untuk pengendali sumbu azimuth turret pada turret-gun kaliber 20mm. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), A512–A516.

Penilaian Simpangan Pergerakan Interpolasi Angular pada Mesin Frais CNC Menggunakan *Double Ballbar*

Gagan Ganjar Tabah¹ dan Brilliant Dwinata¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

gagan.ganjar@lecture.unjani.ac.id, briliant.dwinata@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Mesin *Computer Numerical Control* mampu membuat lintasan berbentuk lingkaran dengan menggerakkan dua sumbu secara simultan pada salah satu bidang XY, XZ, atau YZ. Apabila koordinasi kedua sumbu tersebut kurang baik, maka akan menyebabkan terjadinya kesalahan interpolasi lingkaran yang berpengaruh terhadap kesalahan kebulatan pada benda kerja hasil pemesinan. Kesalahan pergerakan kedua sumbu dapat diukur menggunakan *double ballbar*, untuk mengetahui kesalahan pergerakan tersebut maka divariasikan dengan tiga kecepatan makan. Metode penelitian yang digunakan adalah metode analisa perbandingan hasil pengukuran *double ballbar*. beberapa informasi dari hasil pengukuran adalah nilai kesalahan *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, dan *Centre offset*. Kecepatan makan sangat berpengaruh terhadap kesalahan *geometric*, semakin besar nilai kecepatan makan maka semakin besar pula nilai kesalahannya. Selain kecepatan makan banyak sekali faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran *double ballbar* antaralain *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, pengulangan pengujian, dsb.

Kata kunci: *double ballbar*, kebulatan, kecepatan makan, mesin *computer numerical control*, simpangan interpolasi angular.

Abstract

The Computer Numerical Control machine is capable of making circular paths by moving two axes simultaneously in one of the XY, XZ, or YZ planes. If the coordination of the two axes is not good, it will cause circle interpolation errors that affect the roundness error in the machining workpiece. The error of the movement of the two axes can be measured using a double ballbar, to find out the error of the movement, it is varied with three feeding speeds. The research method used is the method of comparative analysis of double ballbar measurement results. some information from the measurement results is the error value of *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, and *Center offset*. Feeding speed is very influential on geometric errors, the greater the value of feeding speed, the greater the error value. In addition to feeding speed, there are many factors that affect the results of double ballbar measurements, including *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, test repetition, etc.

Keywords: *double ballbar*, circularity, velocity feeds, computer numerical control machine, angular interpolation deviation

1. Pendahuluan

Pengoperasian mesin perkakas CNC (*Computer Numerical Control*) dilakukan dengan sedikit intervensi dari operator, oleh karena itu mesin perkakas CNC harus memiliki ketelitian yang lebih tinggi dibanding dengan mesin perkakas manual. Pemeriksaan kesalahan pergerakan interpolasi angur pada mesin perkakas direkomendasikan secara berkala yang salah satunya adalah pemantauan ketelitian interpolasi (Prakosa et al., 2010).

Mesin *Computer Numerical Control* (CNC) memiliki tiga sumbu yaitu X, Y, dan Z yang dapat bergerak secara mandiri maupun simultan. Semua sumbu harus diukur ketelitian geometri (Rochim, 2016). Berdasarkan standar ISO 230-4 ada beberapa kesalahan *circular* dan kesalahan *radial* antara lain adalah *bi-directional circular deviation*, *circular deviation*, *radial deviation* dan *mean bi-directional radial deviation*. Salah satu ketelitian yang diukur adalah kesalahan interpolasi lingkaran pada suatu bidang XY, XZ, dan YZ (Esmaeili & Mayer, 2020), interpolasi adalah gerakan yang dihasilkan oleh kombinasi lebih dari satu sumbu secara simultan.

Beberapa metoda yang dapat digunakan untuk pemeriksaan kesalahan koordinasi antara dua sumbu saat melakukan pergerakan interpolasi antara lain adalah melalui uji pemesinan dan pengujian menggunakan *Double BallBar* (DBB) (Prakosa et al., 2010).

Info Makalah:

Dikirim : 03-14-22;
Revisi 1 : 06-10-22;
Revisi 2 : 06-21-22;
Diterima : 06-21-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8122-0677-412
e-mail : gagan.ganjar@lecture.unjani.ac.id

Pemeriksaan menggunakan DBB merupakan pendekatan yang baik untuk mendapatkan kesalahan geometrik pada sumbu putar, sehingga dapat diterapkan untuk penggunaan praktis dalam proses perakitan, perawatan dan pemeriksaan rutin peralatan mesin CNC multi-sumbu (Jiang & Cripps, 2015). Pengukuran ini dapat melihat hingga enam jalur pengukuran *volumetric* dengan semua sumbu umpan bergerak, dan dapat membandingkan jalur pengukuran satu dengan yang lainnya (Kauschinger et al., 2020).

Double BallBar dapat mengidentifikasi *Position Independent Geometric Errors* (PIGEs) kesalahan residual setelah kompensasi PIGE memberi kontribusi kesalahan 8,76% dari total kesalahan, yang mungkin disebabkan oleh kesalahan termal dan kesalahan kinematik. Karena pengukuran melibatkan kedua sumbu yang bergerak secara bersamaan, pengukuran ini tidak hanya dapat mencerminkan PIGE dari setiap sumbu putar, tetapi juga menilai koordinasi geometrik dan kinematik antara dua sumbu putar, yang secara komprehensif dapat mencerminkan akurasi geometrik alat mesin lima sumbu.(Jiang et al., 2019).

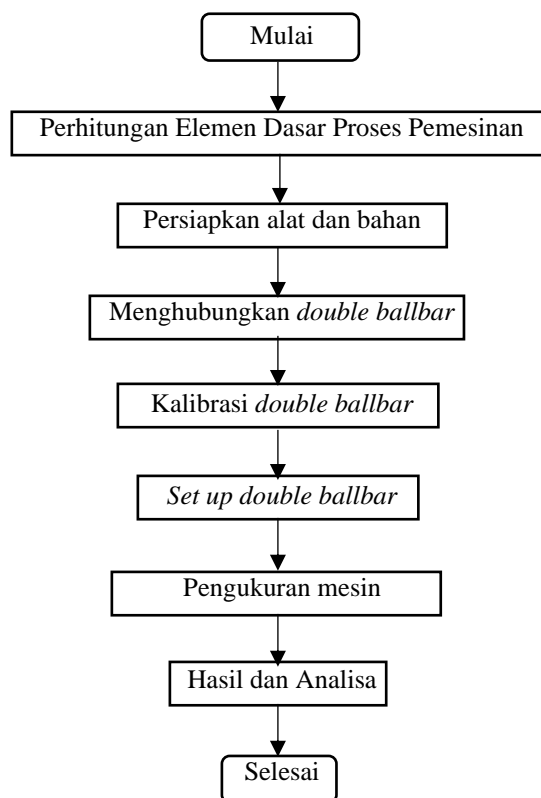
Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi kecepatan makan terhadap simpangan interpolasi lingkaran menggunakan *Double BallBar* (DBB).

2. Metode

Objek mesin uji pada penelitian ini adalah mesin CNC frais tiga sumbu merk Hartford Pro 800 dan pengukuran difokuskan pada bidang XY. Pengukuran kesalahan pergerakan interpolasi dapat dilakukan melalui dua cara yaitu pengukuran menggunakan laser interferometer atau *double ballbar* dan pengukuran terhadap hasil uji *cutting* menggunakan *Coordinate Measuring Machine* (CMM).(Prakosa et al., 2010). Metode pengukuran menggunakan *double ball bar* dapat mengidentifikasi delapan *Position Independent Geometric Errors* (PIGEs) pada mesin lima sumbu memberikan nilai kepresisian yang tinggi (Xiang et al., 2014)

Metode penelitian menggunakan metode analisis secara deskriptif pada data hasil pengukuran *double ballbar*. penentuan nilai untuk *feeding* pada DBB dihitung berdasarkan nilai *feeding* yang diperoleh dari perhitungan *feeding* uji pemesinan, lalu dilakukan proses Analisis. Hasil pengukuran pada mesin dengan menggunakan *double ballbar* dapat dilihat secara langsung.

Pada Gambar 1. ditunjukkan diagram alir tahapan pengukuran kesalahan pergerakan interpolasi menggunakan *double ballbar*.



Gambar 1. Diagram Alir Pengujian *Double Ballbar*.

Penjelasan diagram alir pengujian *double ballbar*;

- Perhitungan Elemen Dasar Proses Pemesinan akan digunakan sebagai masukan pada mesin frais CNC.
- mempersiapkan alat dan bahan yang digunakan diantaranya adalah *double ballbar*, Mesin CNC *milling* Hartford tiga sumbu, komputer khusus *double ballbar*, dan membuat *G-Code* untuk masukan pada mesin CNC.
- Menghubungkan *double ballbar* dengan komputer yang telah terpasang *software* QC20-W melalui *bluetooth*.
- Kalibrasi *double ballbar* ini dilakukan setelah *ballbar* terhubung dengan komputer, pengkalibrasian dilakukan *zerodur calibrator* sesuai panjang *bar* yang digunakan.

- e. Setup *double ballbar* pada mesin CNC yang telah terhubung dengan computer, lalu masukan *G-code* dari hasil *software double ballbar*.
- f. Pengukuran mesin menggunakan *double ballbar*.
- g. setelah pengukuran mesin, didapatkan hasil yang terlihat pada perangkat lunak

2.1 Perhitungan Elemen Dasar Pemesinan

Penentuan nilai parameter pemesinan untuk kecepatan putar poros *spindle* (n) dan kecepatan makan (V_f) dihitung berdasarkan formula No.1 dan No. 4.(Rochim, 2007).

$$n = \frac{1000 \cdot vc}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

Kecepatan putar poros *spindle* ini dipengaruhi oleh kecepatan potong dari material benda kerja, Setiap material memiliki nilai kecepatan potong yang berbeda. Pada tabel 1 didapatkan nilai kecepatan potong sebesar 165 *feet/minute* untuk material *wrought aluminum 6061-T6*.

Tabel 1. Kecepatan potong (LittleMachineShop.com, n.d.)

Material	AISI/SAE/ASTM Designation	Feet/Minute
<i>Free machining plain carbon steels</i>	1212. 1213. 1215	130-140
<i>Plain carbon steels</i>	1006. 1008. 1009. 1010	65-110
<i>Cold work, air hardening tool steel</i>	A2. A3. A4. A6	40-50
<i>Stainless steels (Austenitic)</i>	201. 202. 301. 302. 304	70-75
<i>Bronze</i>	C22600. C65100. C65500. C67500	30-80
<i>Wrought aluminum</i>	6061-T6. 5000. 6000. and 7000 series	165
<i>Cast aluminum</i>	<i>Sand and permanent mold casting alloys</i>	165

Berikut ini adalah perhitungan kecepatan putar poros *spindle* untuk material *aluminum 6061-T6*.

$$vc \text{ Al6061 - T6} = \frac{165 \frac{ft}{m}}{3,28 \frac{ft}{m}} \quad (2)$$

$$vc \text{ Al6061 - T6} = 50,3 \text{ m/min} = 50 \text{ m/min}$$

Setelah mendapatkan nilai kecepatan potong, nilai tersebut dapat digunakan untuk menghitung kecepatan putar poros *spindle* dan pahat potong yang digunakan adalah *flat end mill* berdiameter 20 mm.

$$n = \frac{1000 \cdot 50 \text{ m/min}}{\pi \cdot 20 \text{ mm}} \quad (3)$$

$$n = 796,17 \text{ rpm} = 796 \text{ rpm}$$

Kecepatan putar poros *spindle* tersebut dimasukkan untuk pembuatan program *G-code* pada mesin frais CNC tiga sumbu. Nilai kecepatan putar poros *spindle* dapat digunakan untuk menghitung kecepatan makan pada formula No. 4.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = (\text{mm/min}) \quad (4)$$

Nilai f_z pada formula No. 4 dapat diperoleh dari tabel 2 yang disediakan oleh standar alat potong. Berikut ini tabel nilai f_z untuk alat potong dari standar sandvik:

Tabel 2. Nilai f_z untuk Alat Potong *flat end mil* (Sandvik, n.d.)

ISO/ANSI	CMC	Dc (mm)	Feed/tooth (fz) (mm)
P	02.1	1	0,001-0,01
		2-3	0,01-0,02
M	05.21	4	0,02-0,04
		5	0,03-0,06
K	08.2	6	0,03-0,07
		7	0,04-0,08
S	23.22	8	0,05-0,09
		9	0,07-0,10
H	04.1	10	0,07-0,12
		12	0,08-0,13
H	04.1	14	0,08-0,14
		16	0,09-0,15
H	04.1	20	0,10-0,16

Berdasarkan tabel 2 nilai F_z untuk diameter alat potong *flat end mill* sebesar 20 mm adalah 0,15 mm/gigi. Jika *flute* alat potong yang digunakan berjumlah empat, nilai V_f dapat dihitung dengan merefer ke formula no 4.

$$v_f = 0,15 \text{ mm} \cdot 4 \cdot 796 \text{ rpm} \quad (5)$$

$$v_f = \frac{477,6 \text{ mm}}{\text{min}} = 477 \text{ mm/min} \quad (6)$$

Berdasarkan formula No. 6 didapatkan nilai Kecepatan makan sebesar 477 mm/min, nilai tersebut digunakan untuk masukan dalam pembuatan program *G-code* mesin frais CNC tiga sumbu.

2.2 Data Umum Mesin dan Alat Ukur

Penelitian ini menggunakan mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-sumbu, data umum mesin dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data Umum Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-Sumbu (Hartford, 2018)

Machine Model	Pro-800		
Table	Working surface	900x470 (35.4x18.5) mm (inch)	
	Max. table load	500 (1 102.3 I) Kg (ibs.)	
Travel	Longitudinal travel (X-axis)	800 (31.5) mm (inch)	
	Cross travel (Y-axis)	510 (20.08) mm (inch)	
	Vertical travel (Z-axis)	630 (24.8) mm (inch)	
Spindle	Spindle nose taper	E40	
	Spindle speed (pulley)	8000 OP1. 10000/12000 rpm	
	Spindle speed (Gear)	Opt. 6000 rpm	
Feed	Rapid traverse rate (X/Y/Z)	24/24/20 m/min(ipm)	
		(944.88/944.88/787.4)	

Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.

Gambar 2. Mesin CNC *milling* Hartford Pro 800 3-Sumbu (Hartford, 2018)



Alat ukur yang digunakan adalah *double ballbar* Renishaw dengan tipe QC20-W, alat ukur ini digunakan untuk mengukur mesin CNC Hartford pro 800 pada penelitian ini dengan data umum mesin sebagai berikut.

Tabel 4. Data Umum *Double Ballbar* (Renishaw plc, 2009)

Sensor resolution	0.1 μm	4 μin
Ballbar measurement accuracy*	$\pm (0.7 + 0.3\%L) \mu\text{m}$	$\pm (27.6 + 0.3\% L) \mu\text{in}$
Ballbar measuring range	$\pm 1.0 \text{ mm}$	$\pm 0.04 \text{ in}$
Sensor stroke	-1.25 mm to +1.75 mm	-0.05 in to +0.07 in
Maximum sample rate	1000 Hz	1000 Hz
Data transmission Bluetooth. Class 2	10 m Typical	33 ft typical
Operating range	0 $^{\circ}\text{C}$ - 40 $^{\circ}\text{C}$	32 $^{\circ}\text{F}$ - 104 $^{\circ}\text{F}$
System case dimensions	395 x 300 x 105 mm	15.5 x 11.8 x 4.1 in
System case weight incl. kit contents	3.75 kg (approx)	8 lb 4 oz (approx)

Alat ukur *double ballbar* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Renishaw QC20-W *Wireless Ballbar System* (Renishaw plc, 2009)

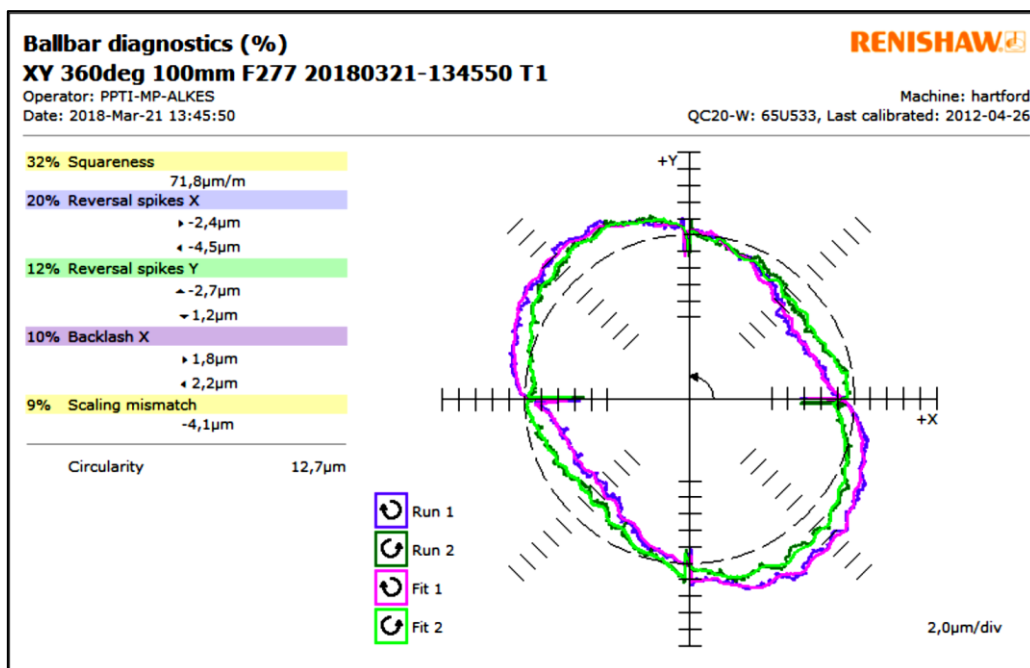
2.2 Pengukuran *Double ballbar*

Penelitian ini menggunakan alat ukur *double ballbar* Renishaw QC20-W *wireless ballbar system*. Renishaw QC20-W ini digunakan untuk mengukur kesalahan interpolasi yang terjadi pada mesin frais CNC Hartford, dari pengukuran menggunakan *double ballbar* akan didapat nilai kebulatan. Pengukuran ini akan dilakukan dengan tiga variasi kecepatan makan, kecepatan makan yang telah diperhitungkan diatas adalah 477 mm/min, maka variasi kecepatan makan yang digunakan adalah 277 mm/min, 477 mm/min, dan 677 mm/min.

Pengukuran *double ballbar* ini divariasikan dengan tiga kecepatan makan dan sembilan kali pengukuran pada seluruh kecepatan makan. Tahapan pengujian pada penelitian ini mengacu pada modul Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin CNC *milling (Vertical Machining Centre)* 3 sumbu berdasarkan pengaturan *volumetric test software ballbar* Renishaw QC20-W (Setiawan et al., 2015).

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah seluruh tahapan proses pengujian *Double Ball Bar (DBB)* dengan menggunakan mesin RENISHAW QC20-W pada mesin CNC *milling* HARTFORD tiga sumbu, dan didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengukuran *Double Ballbar*

Pada pengujian ini dibuat tiga variasi kecepatan makan dengan sembilan kali pengukuran yang dilakukan, maka didapatkan nilai *circularity*, *backlash*, *squareness*, *straightness*, dan *centre offset* dari mesin, data dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Rata-Rata Hasil Pengukuran Menggunakan *Double Ballbar*

Nilai			<i>Feed</i> (mm/min)		
			277	477	677
<i>Circularity error</i> (μm)			15,52	18,48	19,79
<i>Backlash</i> (μm)	Sb. X	(+)	-0,06	-0,02	-0,68
		(-)	-0,13	-0,28	-1,19
	Sb. Y	(+)	-0,31	-0,5	-0,3
		(-)	-1,79	-1,5	-0,18
<i>Squareness</i> ($\mu\text{m}/\text{m}$)			73	71,6	-67,03
<i>straightness</i> (μm)	Sb. X		1,24	2,52	1,8
	Sb. Y		0,46	-0,87	3,28
<i>centre offset</i> (μm)	Sb. X		-43,92	-66,8	31,63
	Sb. Y		18,91	32,76	62,09

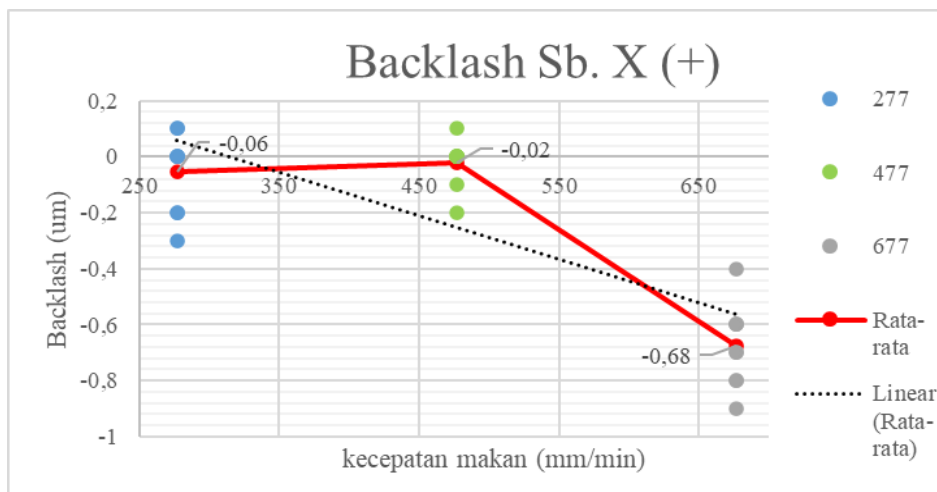
Dari tabel diatas dapat dilihat nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah 15, 52 μm , sedangkan nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah 18,48 μm , dan nilai *circularity error* untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah 19,79 μm . Perbandingan untuk ketiga variasi kecepatan makan dapat dilihat pada gambar 5. Grafik *circularity error*.



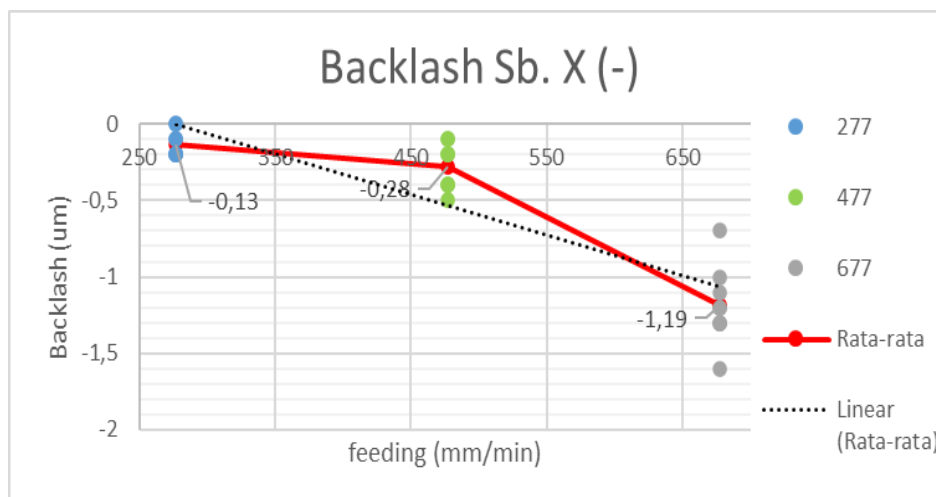
Gambar 5. Grafik *Circularity Error*.

Pada gambar 5 ditunjukkan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah 15,52 μm dan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah 18,48 μm , maka terjadi kenaikan nilai *circularity error* antara kecepatan makan 277 mm/min dengan kecepatan makan 477 mm/min adalah 2,96 μm . Nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah 19,79 μm , jika dibandingkan dengan nilai rata-rata *circularity error* untuk kecepatan makan 477 mm/min terjadi kenaikan nilai sebesar 1,31 μm . Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa kecepatan makan berbanding lurus dengan nilai *circularity error*.

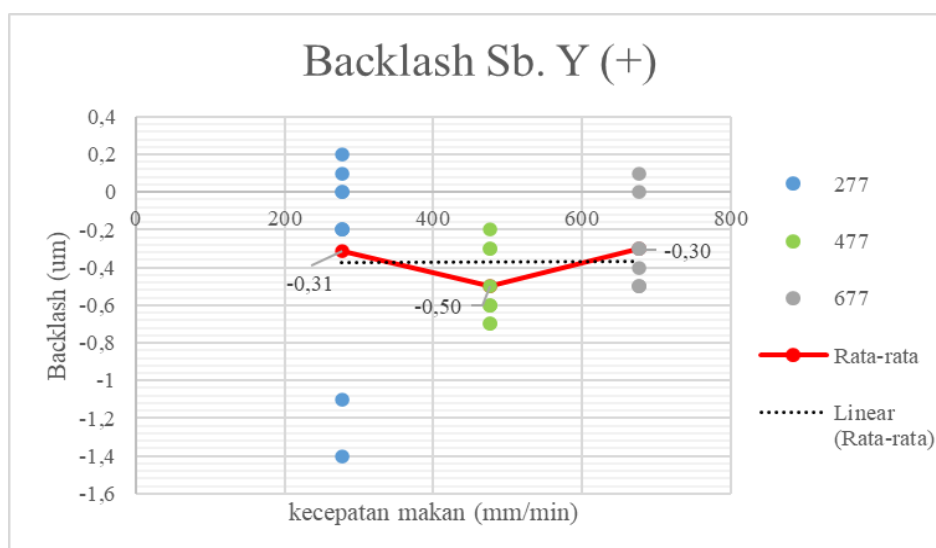
Backlash terjadi akibat adanya *clearance* pada *ballscrew*. *Backlash* akan muncul disebabkan oleh keausan pada *ballscrew*. *Backlash* muncul dalam dua arah pergerakan sumbu, yaitu pergerakan arah positif dan arah negatif. (Renishaw plc, 2009). Ketika bergerak menuju letak kesalahan yang ditentukan *backlash* positif akan terlihat sebagai langkah keluar yang dimulai dari sumbu. Sedangkan *backlash* negatif akan terlihat sebagai langkah masuk yang dimulai dari sumbu pada masing-masing sumbu X positif (+), X negatif (-), Y positif (+), dan Y negatif (-) akan ditunjukkan pada masing-masing grafik, nilai rata-rata sumbu X positif (+) ditunjukkan pada gambar 6.



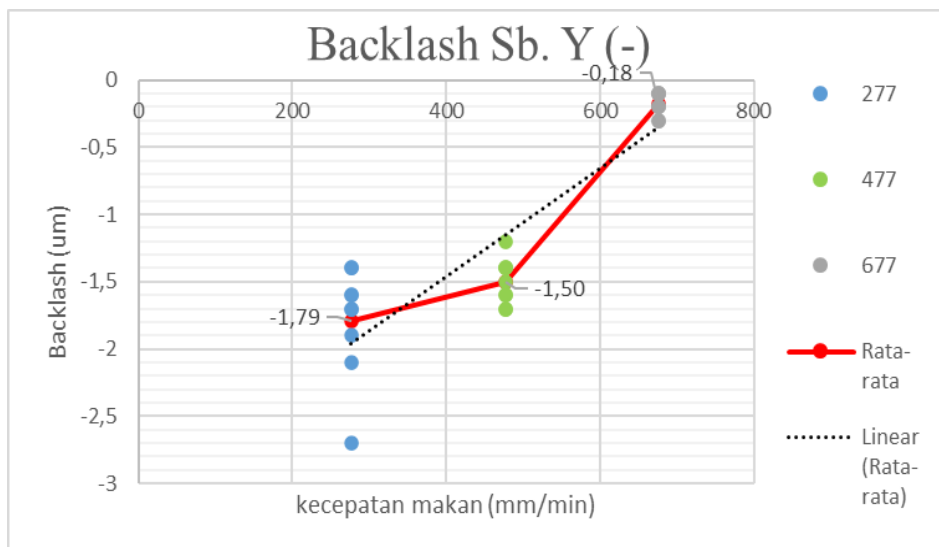
Gambar 6. Grafik *Backlash* Sb. X(+)



Gambar 7. Grafik *Backlash* Sb. X(-)



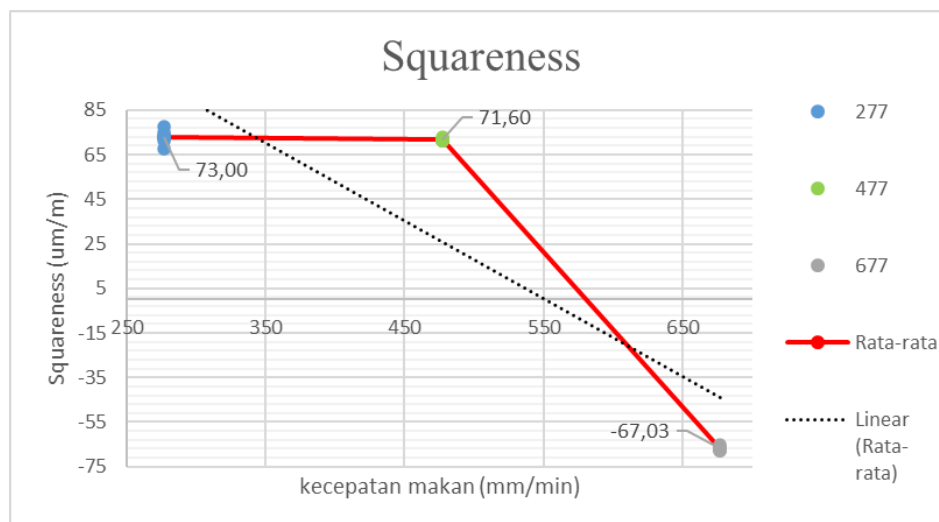
Gambar 8. Grafik *Backlash* Sb. Y(+)



Gambar 9. Grafik Backlash Sb. Y(-)

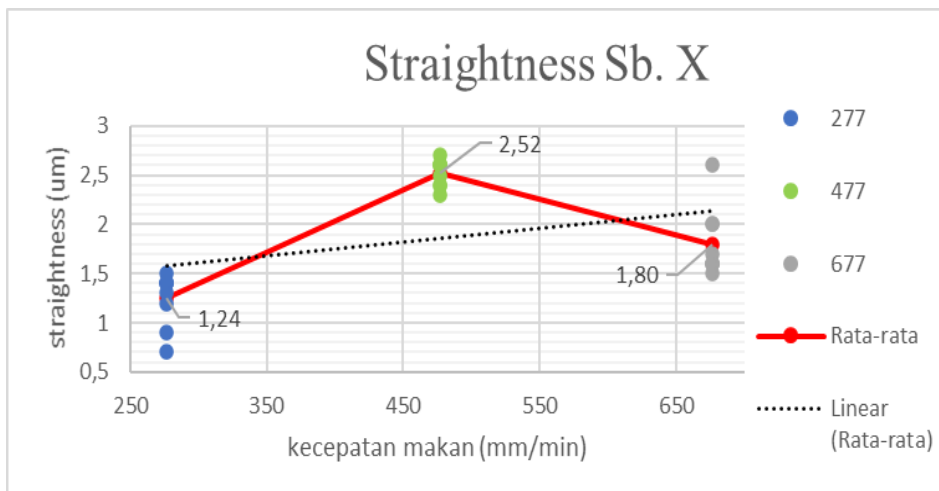
Dapat dilihat dari gambar 6 dan gambar 7 menunjukkan *trendline* nilai *backlash* menurun untuk sumbu X (+) serta sumbu X (-), Nilai *backlash* terukur yang terbaik untuk sumbu X positif (+) adalah kecepatan makan 477 mm/min dan nilai *backlash* terukur yang terbaik untuk sumbu X negatif (-) adalah kecepatan makan 277 mm/min, karena nilai *clearancenya* lebih mendekati nol. Untuk *trendline* nilai *backlash* sumbu Y bergerak naik atau dapat dikatakan berbanding lurus dengan kecepatan makan, nilai terbaik pada sumbu Y(+) dimiliki oleh kecepatan makan 677 mm/min begitu juga dengan nilai terbaik untuk sumbu Y(-).

Squareness adalah nilai ketegaklurusan sumbu x dan y dalam satuan $\mu\text{m/m}$. Nilai yang didapat adalah simpangan dari ketegaklurusan sumbu x dan y, jika nilainya positif artinya sudut antara sumbu x dan y lebih dari 90° dan sebaliknya, nilai *squareness* dalam satuan $\mu\text{m/m}$ yang artinya perubahan sudut bertambah besar setiap 1 μm per 1m (Renishaw plc, 2009).

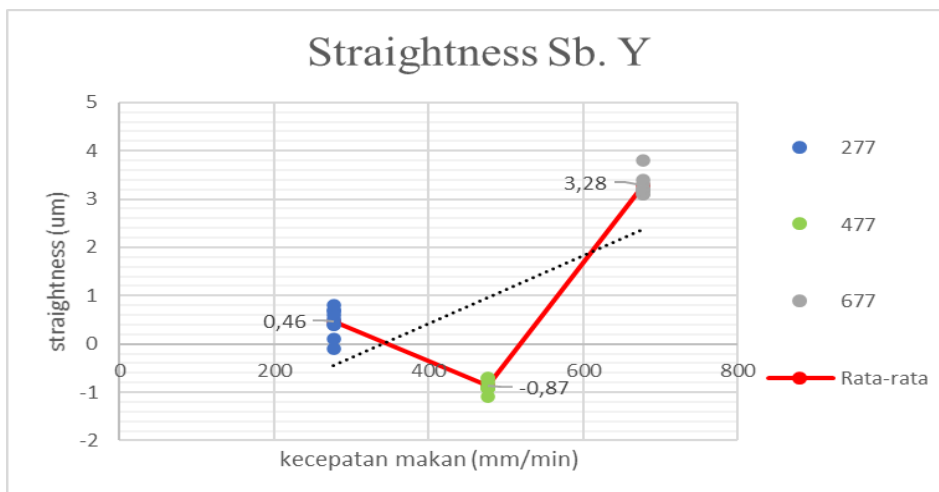


Gambar 10. Grafik Squareness

Pada Gambar 10. ditunjukkan nilai rata-rata *squareness* dari setiap kecepatan makan. Nilai rata-rata untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah $73,00 \mu\text{m/m}$ atau sama dengan $4,18 \times 10^{-3}^\circ$, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min $71,60 \mu\text{m/m}$ sama dengan $4,10 \times 10^{-3}^\circ$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $-67,03 \mu\text{m/m}$ atau sama dengan $-3,84 \times 10^{-3}^\circ$. Dari ketiga kecepatan makan tersebut, terjadi perubahan nilai ketegaklurusan sumbu pada kecepatan makan 677/min sedangkan pada kecepatan makan lainnya bernilai positif, tetapi dilihat dari *trendline* bergerak turun, maka dapat disimpulkan nilai *squareness* berbanding terbalik dengan kecepatan makan atau kesalahan kelurusan dapat disebabkan oleh kesalahan bentuk (*profile errors*) dari *bed*, *coulumn*, *saddle*, dan *guide ways* mesin perkakas yang dihasilkan pada saat proses pembuatan setiap komponen dan perakitanannya. (Renishaw plc, 2009). Nilai rata-rata kesalahan kelurusan untuk ketiga kecepatan makan ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12.

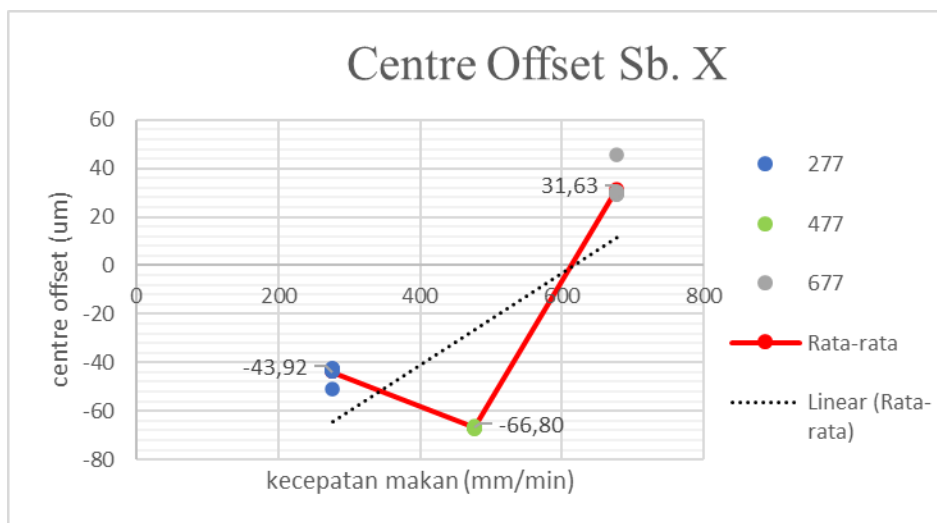


Gambar 11. Grafik *Straightness* Sb. X

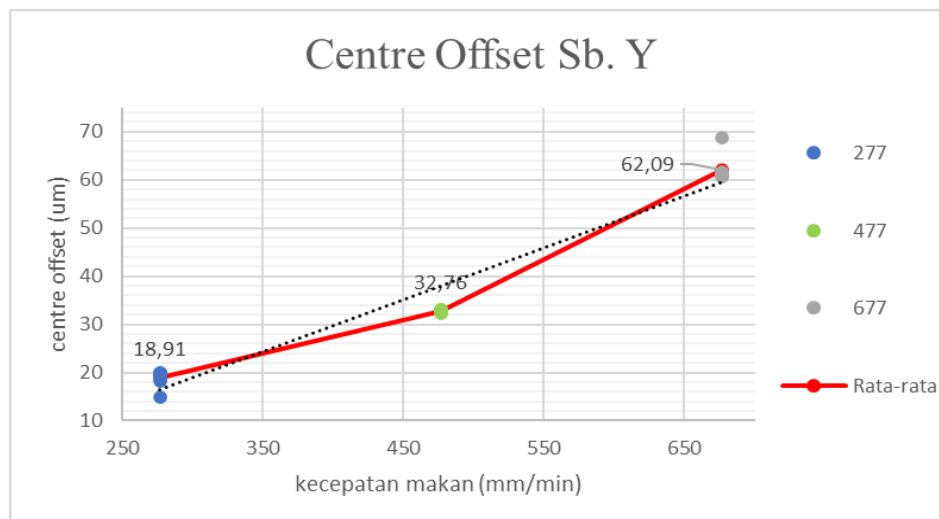


Gambar 12. Grafik *Straightness* Sb. Y

Pada Gambar 11 dan 12 ditampilkan bahwa kecenderungan kesalahan kelurusan pada sumbu X dan sumbu Y adalah bergerak naik, nilai yang lebih mendekati nol adalah nilai rata-rata dari kecepatan makan 677 mm/min dengan nilai 0,46 μm dan untuk sumbu X adalah 1,24 μm dengan kecepatan makan sebesar 277 mm/min.



Gambar 13. Grafik *Centre Offset* Sb. X



Gambar 14. Grafik *Centre Offset* Sb. Y

Centre offset (X, Y) menunjukkan nilai kesalahan posisi center yang terukur terhadap center yang seharusnya. Nilai *centre offset* sumbu X untuk ketiga kecepatan makan dapat dilihat pada Gambar 13. nilai rata-rata untuk ketiga kecepatan makan adalah berbeda, untuk nilai rata-rata kecepatan makan 277 mm/min adalah $-43,92 \mu\text{m}$, sedangkan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah $-66,80 \mu\text{m}$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $31,63 \mu\text{m}$. Dari ketiga hasil tersebut untuk nilai rata-rata yang lebih mendekati nol adalah kecepatan makan 677 mm/min.

Nilai rata-rata dari ketiga kecepatan makan untuk *center offset* pada sumbu Y semakin meningkat, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 277 mm/min adalah $18,91 \mu\text{m}$, nilai rata-rata untuk kecepatan makan 477 mm/min adalah $32,76$, dan nilai rata-rata untuk kecepatan makan 677 mm/min adalah $62,09$, dapat dilihat dari ketiga nilai tersebut bahwa nilai rata-rata yang lebih mendekati nol adalah nilai dari kecepatan makan 277 mm/min. Untuk *trendline* pada grafik *centre offset* sumbu Y bergerak naik. Maka dapat disimpulkan *centre offset* pada sumbu Y berbanding lurus dengan kecepatan makan begitu pula untuk sumbu X.

Dari data yang didapat melalui pengukuran *Double BallBar* (DBB) dengan tiga variasi kecepatan makan, hasil yang diperoleh yaitu, *Circularity*, *Backlash*, *Squareness*, *Straightness*, dan *Centre offset* dari mesin CNC *milling* Hartford tersebut. Pengaruh kecepatan makan dengan tiga variasi yang berbeda dan sembilan kali pengukuran, banyak sekali faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran *double ballbar* yaitu *ballscrew*, *clearance*, *servo mismatch*, pengulangan pengujian, dsb.

Kesimpulan

Dapat disimpulkan untuk setiap hasil pengukuran terdapat perbedaan nilai antara ketiga kecepatan makan, sebagai berikut:

1. *Circularity*, kecepatan makan sangat berpengaruh pada nilai *circularity*-nya, semakin besar kecepatan makan maka semakin besar pula nilai *circularity*-nya.
2. *Backlash*, didapat hasil pengukuran sumbu X(+), X(-), hasilnya menurun seiring dengan perubahan kecepatan makan. Y(+), dilihat dari *trendline* tidak terjadi perubahan naik atau pun turun, dan Y(-) nilainya berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan makan.
3. *Squareness*, hasil dari tiga variasi kecepatan makan terjadi perubahan ketegaklurusan/derajat antara sumbu x dan y pada kecepatan 677 mm/min, nilainya berubah dari positif menjadi negatif sehingga kecepatan makan sangat berpengaruh pada ketegaklurusan sumbu x dan y.
4. *Straightness*, nilai *straightness* terbagi dalam dua sumbu yaitu sumbu x dan sumbu y, dari grafik terlihat perbedaan bentuk kurva antara sumbu x dan y, untuk sumbu x bentuk kurvanya V terbalik tetapi untuk sumbu y kurvanya berbentuk V.
5. *Centre offset*, terbagi dalam dua sumbu x dan y. untuk sumbu x sendiri kecepatan makan sangat mempengaruhi pergeseran center terlihat pada kecepatan makan 277 mm/min ke kecepatan makan 477 mm/min terjadi pembesaran nilai negatif, tetapi dari kecepatan makan 477 mm/min ke kecepatan makan 677 mm/min nilainya berubah menjadi positif. Pada sumbu y terlihat jelas semakin besar kecepatan makan maka semakin besar nilai simpangan center-nya.

Saran

Penelitian selanjutnya dapat dilanjutkan secara komprehensif sehingga dapat menghasilkan rekomendasi algoritma penentuan nilai kecepatan makan yang tepat untuk program (*G-code*) lintasan pengukuran kesalahan interpolasi *double Ballbar*.

Daftar Notasi

V_c	= Kecepatan potong (mm/min)
D	= Diameter alat potong (mm)
V_f	= Kecepatan makan (mm/min)
f_z	= Pemakanan per gigi (mm/gigi)
z	= Jumlah <i>flute</i>
n	= Putaran Poros (rpm)

Daftar Pustaka

- Esmaeili, S., & Mayer, J. R. R. (2020). An integrated geometric and hysteretic error model of a three axis machine tool and its identification with a 3D telescoping ball-bar. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp4010024>
- Hartford. (2018). *Power Center/PRO series*. <http://www.hartford.com.tw/en/Product/Vertical-Machining-Center/PRO>
- Jiang, X., & Cripps, R. J. (2015). A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.010>
- Jiang, X., Wang, L., & Liu, C. (2019). Geometric accuracy evaluation during coordinated motion of rotary axes of a five-axis machine tool. *Measurement*, 146, 403–410. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.03.060>
- Kauschinger, B., Friedrich, C., Zhou, R., & Ihlenfeldt, S. (2020). FAST EVALUATION OF THE VOLUMETRIC MOTION ACCURACY OF MULTI-AXIS MACHINE TOOLS USING A DOUBLE-BALLBAR. *Journal of Machine Engineering*, 20(3), 44–62.
- LittleMachineShop.com. (n.d.). *Cutting Speeds*. Diambil 19 Mei 2020, dari <https://littlemachineshop.com/reference/cuttingspeeds.php#Milling>
- Prakosa, T., Wibowo, A., Yuwana, Y., & Nurhadi, I. (2010). PENGUJIAN KETELITIAN GEOMETRIK MESIN PERKAKAS CNC MILLING VERTIKAL BUATAN DALAM NEGERI. *Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri*, 141–146.
- Renishaw plc. (2009). *The Renishaw QC20-W wireless ballbar for machine tool performance diagnosis QA compliance Production pressures !* (No. L8014158904A; Nomor 0413).
- Rochim, T. (2007). *Klasifikasi Proses, Gaya & Daya Pemesinan*. (1 ed., Vol. 1). ITB Press.
- Rochim, T. (2016). *Spesifikasi, Metrology, & Control Kualitas Geometrik* (1 ed.). ITB Press.
- Sandvik. (n.d.). *Milling Formulas and Definitions*. Diambil 19 Maret 2020, dari <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- Setiawan, N. A., Prakosa, T., & Wibowo, A. (2015). *Pembuatan Modul Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Cnc Milling Vertikal Dengan Metode Double Ball Bar*. *Snttm Xiv*, 7–8.
- Xiang, S., Yang, J., & Zhang, Y. (2014). Using a double ball bar to identify position-independent geometric errors on the rotary axes of five-axis machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12), 2071–2082. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5432-9>