

Thaufiq Sabtiawan, M. Reza Hidayat, Yussi Perdana Saputera, dan Nivika Tiffany Somantri
Antena Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Array 1×4 Axe Patch Microstrip pada Frekuensi 2,4 GHz

Lidya Risang Ayu, Lienda Aliwarga, dan Sanggono Adisasmito
 Karakterisasi Asam Lemak dan Aktivitas Antioksidan Minyak Hasil Ekstraksi Biji Kelor

Nivika Tiffany Somantri, Yuda Bakti Zainal, Wibisana Nugraha, M. Reza Hidayat, Dede Furqon Nurjaman, dan Naftalin Winanti
 Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembapan pada Mesin Tetes Telur Penyu Berbasis IoT Di Penangkaran Penyu Batu Hiu Pangandaran

R. Mohamad Fajar Gunawan, Soleh Wahyudi, Andrie Harmaji, Diana Kamaliyah Ichsan, Gigih Safardwiyansyah, dan Naufal Dhiya Ulhaq
 Model Efisiensi Arus pada Elektrolisis Serbuk Tembaga Menggunakan Metode Perancangan Percobaan Faktorial Desain 2^k

Gusti Umindya Nur Tajalla, Prisky Andriansyah, Ilham Tri Riyadi, Mei Lisa Nur Vadila, dan Andromeda Dwi Laksono
 Karakteristik Termal Material Komposit Berbahan Dasar Polipropilena dan Batang Pisang

Muhammad Ilham, Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani, dan Kadarsah Suryadi
 Pembangunan Model Pendeteksi Risiko Preeklamsia pada Ibu Hamil dengan Menggunakan Metode *Data Mining*

Fauzia Haz, Arya Mustopa, Giri Angga Setia, Dede Furqon, Atik Charisma, dan M. Reza Hidayat
Reliability Index Assessment-Section Technique pada Distribusi Listrik Penyulang Suci Menggunakan *Software* ETAP

Ervin Dwi Saputro, Sigit Yoewono Martowibowo, dan Gagan Ganjar Tabah
 Validasi Optimasi Kekasaran Permukaan dan Keausan Tepi Pahat Proses Bubut Menggunakan Metode Taguchi dengan Data Tunggal

Xbal Meiprastyo, Ronni IS Rono Hadinagoro, Prima Sukma Yuana, dan Ragil Rajvikhil
 Analisis Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang dengan Berbagai Metode

TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Fitri Hadiah, S.T., M.T., IPM
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- Dr. Iris Mahani, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57197848218)
 - Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Sinta ID : 133135)
- Editors : • Andri Rahmat Kumalasian Nasution, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6718339)
- Andini Hizbiyati, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
 - 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, Indonesia, Scopus ID: 56545755100)
 - Ragil Handito, S.T., M.Eng.
(Korea National University of Transportation, Korea.)
 - Tiara Ariani Putri, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
 - Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)

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 2024

- Reviewers :
- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 6506054959]
 - Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.T., M.E. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57222001511 & 57208864466] [SINTA ID: 6882330]
 - Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 15128239500]
 - Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 43461203000]
 - Prof. Dr. Ir Lilik Sudiajeng, M.Erg.
(Politeknik Negeri Bali, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189864100]
 - Dr. Arief Nur Pratomo, S.T., M.T. *s
(Universitas Pertahanan, Indonesia) [SCOPUS ID: 57216756313]
 - Dr. Asep Najmurokhman, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55919091000]
 - Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M.
(Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia) [SCOPUS ID: 23975188900]
 - Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103]
[ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
 - Dr. Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 25638780900]
 - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 56688583600]
 - Dr. Eng. Dwi Hantoko., B.Sc., M.Sc.
(King Fahd University of Petroleum and Minerals, Arab Saudi) [SCOPUS ID: 57203536113]
 - Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng.
(Institut Pertanian Bogor, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195301854]
 - Dr. Eng. Ir. Nur Indrianti, M.T.
(UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia) [SCOPUS ID: 15071306300]
-

- Dr. Haruman Wiranegara, S.T., M.T.
(Balai Besar Logam dan Mesin - Kementerian Perindustrian, Indonesia) [SINTA ID: 6714161]
- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200332569]
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T.
(Universitas Sriwijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57193694034]
- Dr. Ir. Ariani Budi Safarina, M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.
(Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia) [SCOPUS ID: 6507211795]
- Dr. Ir. Endang Prasetyaningsih, M.T.
(Univesitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189580587]
- Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195229456]
- Dr. Ir. Herman, M.T.
(Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia) [SINTA ID: 6030796]
- Dr. Ir. Nita Puspita Hidayat, M.T.
(Universitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201677362]
- Dr. Ir. Oviyan Patra, M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6756651]
- Dr. Ir. Sutarno, M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57205031839]
- Dr. Ir. Zaenal Muttaqien, S.T., S.E., S.Pd., M.T., IPU., ASEAN Eng., ACPE., APEC Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 58674304500]
[SINTA ID: 6662264]
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. *
(Universitas Sebelas Maret, Indonesia) [SCOPUS ID: 37114996900]
- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 55584284500]
- Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6098629]

- Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56951380600]
[ORCHID ID: 0000-0003-0200-418X] [SINTA ID: 6001600]
 - Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56582391600]
 - Dr. Sabhan Kanata, ST., M.Eng.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57420428900]
 - Dr. Suhartono, S.T., M.Si.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
 - Dr. Syah Alam, S.Pd., M.T. *
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622]
 - Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia) [SCOPUS ID: 15838524700]
 - Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D.
Institut Teknologi Bandung, Indonesia] [SCOPUS ID: 36093026700]
 - Ir. Harry Ramza, MT., P.hD.
(Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Indonesia) [SCOPUS ID:
55189898100]
 - P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55983351800]
 - Putu Doddy Sutrisna, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 6504553709]
 - Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D.
(Politeknik Negeri Semarang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194209980]
 - Aji Gumilar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6082397]
 - Aji Putro Prakoso, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200571585]
[ORCHID ID: 0000-0002-7290-7352] [SINTA ID: 6747587]
 - Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc. *
(Universitas Islam Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195477115]
 - Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T.
(University of Electro-Communications (UEC), Jepang) [SCOPUS ID: 57188573899]
-

- Atik Charisma, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188567470]
[SINTA ID: 6082832]
- Edwar, S.T., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215427881]
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194219446]
- Herman Budi Harja, S.T., M.T. *
(Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201665196]
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPM. *
(Universitas Muslim Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201065526]
- Ir. Ketut Tomy Suhari, M.T., IPP.
(Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57196485539]
- Ir. Nana Heryana, S.T., M.T., IPM.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 35174665300]
- Khamaludin, S.T., M.T.
(Universitas Islam Syekh Yusuf, Indonesia) [SCOPUS ID: 57223191789]
- M. Reza Hidayat, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188573208]
- Naftalin Winanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200994613]
- Nirmawana Simarmata, S.Pd., M.Sc.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57301196400]
- Salita Ulitia Prini, S.T., M.T. *
(Pusat Riset Telekomunikasi - BRIN, Indonesia) [SCOPUS ID: 57208581701]
- Sofyan Basuki, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6686946]
- Sussi, S.Si., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215071175]
- Tommi Hariyadi S.T., M.T.
(Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 53263841200]
- Wahyu Setyo Pambudi, S.T., M.T.
(ITATS Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57202921245]

DAFTAR ISI

Antena <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> (MIMO) Array 1×4 Axe Patch Microstrip pada Frekuensi 2,4 GHz	01-15
Thaufiq Sabtiawan, M. Reza Hidayat, Yussi Perdana Saputera, dan Nivika Tiffany Somantri	
Karakterisasi Asam Lemak dan Aktivitas Antioksidan Minyak Hasil Ekstraksi Biji Kelor	16-22
Lidya Risang Ayu, Lienda Aliwarga, dan Sanggono Adisasmito	
Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembapan pada Mesin Tetas Telur Penyu Berbasis IoT Di Penangkaran Penyu Batu Hiu Pangandaran	23-32
Nivika Tiffany Somantri, Yuda Zainal, Wibisana Nugraha, M. Reza Hidayat, Dede Furqon Nurjaman, dan Naftalin Winanti	
Model Efisiensi Arus pada Elektrolisis Serbuk Tembaga Menggunakan Metode Perancangan Percobaan Faktorial Desain 2^K	33-40
R. Mohamad Fajar Gunawan, Soleh Wahyudi, Andrie Harmaji, Diana Kamaliyah Ichsan, Gigih Safardwiyansyah, dan Naufal Dhiya Ulhaq	
Karakteristik Termal Material Komposit Berbahan Dasar Polipropilena dan Batang Pisang	41-49
Gusti Umindya Nur Tajalla, Prisky Andriansyah, Ilham Tri Riyadi, Mei Lisa Nur Vadila, dan Andromeda Dwi Laksono	
Pembangunan Model Pendeteksi Risiko Preeklamsia pada Ibu Hamil dengan Menggunakan Metode Data Mining	50-60
Muhammad Ilham, Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani, dan Kadarsah Suryadi	
<i>Reliability Index Assessment-Section Technique</i> pada Distribusi Listrik Penyulang Suci Menggunakan <i>Software</i> ETAP	61-74
Fauzia Haz, Arya Mustopa, Giri Angga Setia, Dede Furqon, Atik Charisma, dan M. Reza Hidayat	
Validasi Optimasi Kekasaran Permukaan dan Keausan Tepi Pahat Proses Bubut Menggunakan Metode Taguchi dengan Data Tunggal	75-82
Ervin Dwi Saputro, Sigit Yoewono Martowibowo, dan Gagan Ganjar Tabah	
Analisis Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang dengan Berbagai Metode	83-90
Xbal Meiprastyo, Rono IS Rono Hadinagoro, Prima Sukma Yuana, dan Ragil Rajvikhah	

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 23 Nomor 1, bulan Mei 2024. Dalam edisi ini disajikan 9 (sembilan) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, Teknik Industri, dan Teknik Geomatika yang meliputi: (1) Antena *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Array 1×4 Axe Patch Microstrip* pada Frekuensi 2,4 GHz, (2) Karakterisasi Asam Lemak dan Aktivitas Antioksidan Minyak Hasil Ekstraksi Biji Kelor, (3) Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembapan pada Mesin Tetas Telur Penyusut Berbasis IoT Di Penangkaran Penyusut Batu Hiu Pangandaran, (4) Model Efisiensi Arus pada Elektrolisis Serbuk Tembaga Menggunakan Metode Perancangan Percobaan Faktorial Desain 2^K , (5) Karakteristik Termal Material Komposit Berbahan Dasar Polipropilena dan Batang Pisang, (6) Pembangunan Model Pendeteksi Risiko Preeklamsia pada Ibu Hamil dengan Menggunakan Metode Data Mining, (7) *Reliability Index Assessment-Section Technique* pada Distribusi Listrik Penyulang Suci Menggunakan *Software* ETAP, (8) Validasi Optimasi Kekasaran Permukaan dan Keausan Tepi Pahat Proses Bubut Menggunakan Metode Taguchi dengan Data Tunggal, dan (9) Analisis Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang dengan Berbagai Metode.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 23 (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 ketidaksempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, Mei 2024

Dewan Redaksi

Antena *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) Array 1×4 *Axe Patch* Mikrostrip pada Frekuensi 2,4 GHz

Thaufiq Sabtiawan¹, M. Reza Hidayat¹, Yussi Perdana Saputera², dan Nivika Tiffany Somantri¹

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

²Program Doktorat Ketahanan, Pascasarjana Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

sabtiawan12@gmail.com, mreza@lecture.unjani.ac.id, yussips@gmail.com, nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Teknologi Antena MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) meningkatkan kinerja jaringan nirkabel dengan mengizinkan penggunaan beberapa antena transmisi dan *receiver* secara bersamaan. Antena MIMO menggunakan elemen antena dalam *array*, seperti antena mikrostrip circular, untuk meningkatkan *throughput* dan keandalan sinyal. Penelitian ini menyimulasikan dan mengembangkan antena mikrostrip *circular* menjadi MIMO 1×4 *axe* dengan *array*, beroperasi pada 2,4 GHz. Simulasi menunjukkan *return loss* (S11) -60,913 dB, *insertion loss* -50,439 dB, VSWR 1,001, *bandwidth* 116,3 MHz, dan *gain* 5,709 dBi. Hasil fabrikasi dan pengukuran mencapai *return loss* (S11) -61,69 dB, *insertion loss* -43,16 dB, VSWR 1,00, *bandwidth* 137,2 MHz pada frekuensi 2,4260 GHz. Meskipun ada pergeseran frekuensi sebesar 260 MHz antara hasil simulasi dan pengukuran, perancangan antena ini berhasil sesuai spesifikasi yang diinginkan.

Kata kunci: Antena, *Array*, *Axe*, *Circular*, MIMO

Abstract

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) Antenna Technology improves wireless network performance by allowing the use of multiple transmit and receive antennas simultaneously. MIMO antennas use antenna elements in an array, such as circular microstrip antennas, to increase signal throughput and reliability. This research simulates and develops a circular microstrip antenna into a 1×4 *axe* MIMO with array, operating at 2.4 GHz. The simulation shows return loss (S11) -60.913 dB, insertion loss -50.439 dB, VSWR 1.001, bandwidth 116.3 MHz, and gain 5.709 dBi. The results of fabrication and measurement achieve return loss (S11) -61.69 dB, insertion loss -43.16 dB, VSWR 1.00, bandwidth 137.2 MHz at a frequency of 2.4260 GHz. Even though there is a frequency shift of 260 MHz between the simulation and measurement results, the design of this antenna is successful according to the desired specifications.

Keywords: Antenna, Array, Axe, Circular, MIMO

1. Pendahuluan

Dalam perkembangan teknologi perangkat telekomunikasi saat ini, antena MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan kinerja jaringan nirkabel (Indarwati, Ika Puspita, 2022) (Emilia & Mujirudin, 2013). Teknologi MIMO memungkinkan penggunaan beberapa elemen antena transmisi dan *receiver* secara simultan untuk meningkatkan *throughput*, kapasitas, dan keandalan sinyal (Budi dkk., 2017). Meskipun antena MIMO terdapat banyak manfaat, ada beberapa masalah yang perlu diatasi dalam implementasinya. Salah satunya adalah mencapai *gain* yang tinggi agar sinyal dapat diterima dengan baik dalam kondisi jaringan yang jauh dari stasiun basis (Faroqi dkk., 2018) dan *bandwidth* yang lebar penting untuk dapat mentransmisikan data dengan kecepatan tinggi dan mendukung banyak pengguna secara bersamaan (Muhidin dkk., 2020). Kemudian untuk mendukung semua itu diperlukan antena dengan *array* dan menyusun seperti antena *microstrip*, yang mana memiliki kelebihan dengan ukuran yang lebih fleksibel dibandingkan dengan antena lainnya (Fitri Amillia dkk., 2023). Sebagai hasilnya, antena *microstrip circular* menjadi salah satu *patch* dasar yang digunakan untuk pembuatan antena MIMO.

Adapun penelitian terkait dengan antena MIMO dan antena *microstrip patch circular* yang sudah dilakukan diantaranya. Penelitian pertama mempelajari tentang MIMO dan penambahan slot untuk meambah frekuensi dari frekuensi 2,4 GHz menjadi 5,52 GHz untuk wifi (Hidayat dkk., 2021). Penelitian kedua mempelajari antena *microstrip patch circular* dengan hasil untuk *wireless* sensor (Sugiarto dkk., 2019). Penelitian ketiga adalah pengguna antena *microstrip* MIMO berbentuk kapak dengan sirkuit *quad band* yang dirancang menggunakan bahan dielektrik FR4 dengan kemampuan yang berbeda 2,4 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz, dan 7,2 GHz untuk aplikasi jaringan nirkabel (Nafiza dkk., 2016). Penelitian ke empat adalah merancang antena *microstrip patch circular* 2x2 beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz untuk aplikasi WLAN (Authors, 2018). Penelitian kelima adalah merancang dan menganalisis antena *microstrip* dipole dengan menggunakan frekuensi 2,4 GHz menggunakan teknologi *array* (Natasya dkk., 2022).

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dan pengukuran antena MIMO *array patch circular* dengan penambahan slot menjadi bentuk kapak (*axe*) untuk frekuensi 2,4 GHz. Simulasi dan pengukuran akan mencakup perancangan

Info Makalah:

Dikirim : 08-30-23;

Revisi 1 : 11-06-23;

Diterima : 11-18-23.

Penulis Korespondensi:

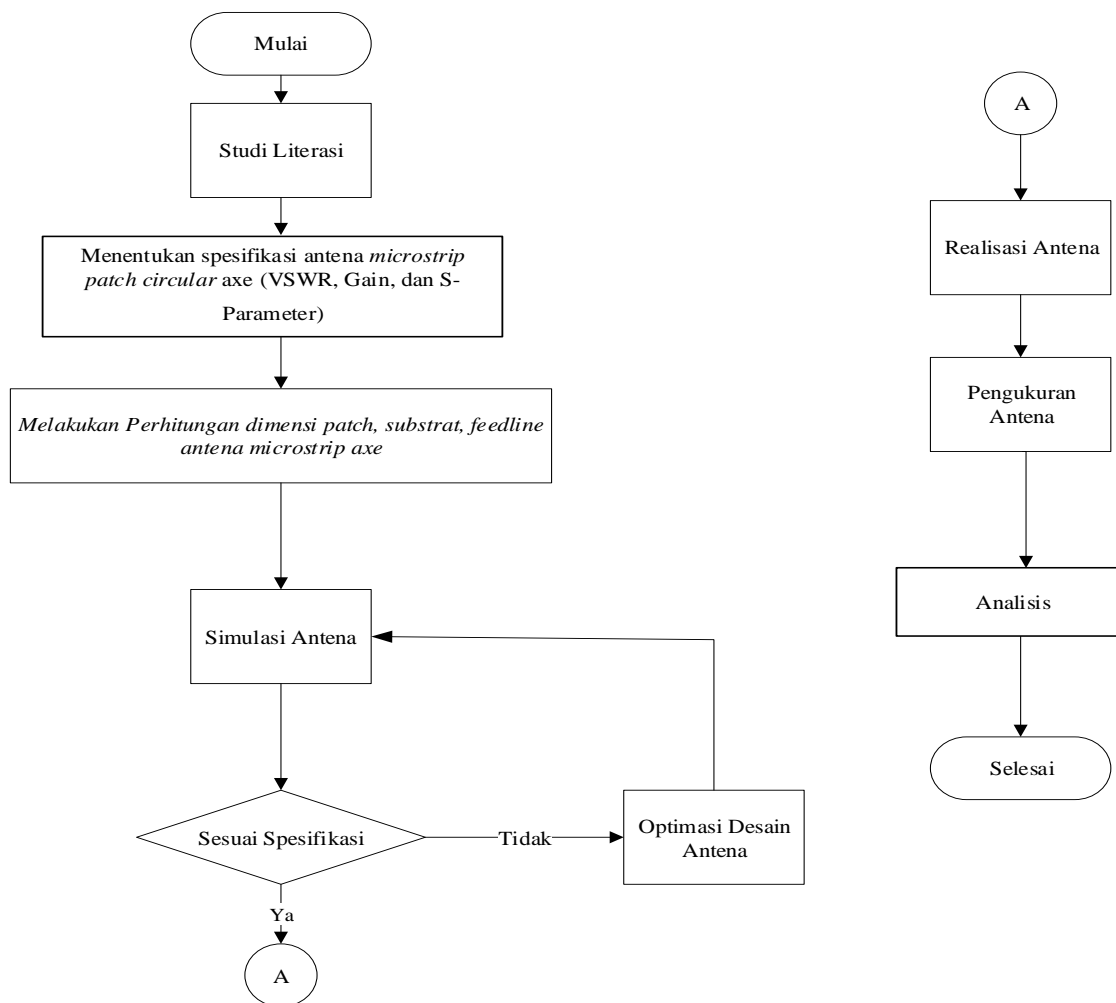
Telp : -

e-mail : mreza@lecture.unjani.ac.id

antena MIMO dalam bentuk antena *microstrip axe array* MIMO 1×4. Melalui perbandingan hasil dari simulasi dan perancangan antena dengan frekuensi 2,4 GHz (Bagus dkk., 2003).

2. Metode

Perancangan antena *circular axe* MIMO dibuat dengan beberapa tahapan perancangan dapat dilakukan secara sistematis. Tahapan perancangan dilakukan dan jelaskan dengan diagram alir seperti pada gambar 1 bahwa dalam menentukan perancangan suatu antena harus menentukan spesifikasi antena terlebih dahulu. Setelah itu menentukan spesifikasi untuk mencari VSWR, Gain, dan S-Parameter. Selanjutnya menghitung dimensi *patch*, *substrat*, *feedline*, antena *microstrip axe* (*microstrip* kapak), kemudian disimulasikan dengan aplikasi CST Suite 2019. Setelah mendapatkan hasil dari simulasi dan tidak sesuai harapan akan mengoptimasi dan simulasi kembali dengan aplikasi CST suite 2019. Setelah mendapatkan hasil antena, kemudian diukur menggunakan VNA, dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Perencanaan Antena.

2.1. Spesifikasi antena

Seperti yang telah dilakukan pada diagram alir di atas spesifikasi antena harus ditentukan dengan mengukuri standar aplikasi yang akan digunakan. Penentuan spesifikasi antena bertujuan agar antena yang disimulasikan dan dibuat memiliki sebuah nilai standar yang dipenuhi. Antena yang akan desain merupakan antena *microstrip circular* dengan bentuk *axe*, *single*, *single* MIMO, *array* MIMO 1×2, *array* MIMO 1×4, dengan spesifikasi pada tabel 1. Kemudian akan dilakukan pada antena dengan port 1 sebagai *transmitter* (pengirim) dan port 2 sebagai *receiver* (penerima).

Tabel 1. Spesifikasi Antena.

Parameter	Spesifikasi Wifi 802.11n
<i>Band</i> Frekuensi	2.2 GHz – 2.6 GHz
<i>Bandwidth</i>	≥ 100 MHz
VSWR	≤ 2
<i>Gain</i>	≥ 2 dBi
<i>Return loss</i>	≤ -10
Pola Radiasi	<i>Unidirectional</i>

2.2. Karakteristik Bahan

Pembuatan antena harus juga memilih bahan untuk dibuat dan material yang akan digunakan untuk pembuatan antena *microstrip* dengan bahan tembaga (*copper*). Material ini akan digunakan pada *patch* dan *groundplane* dan untuk *substart* menggunakan bahan material FR-4 epoxy. Karakteristik dari bahan-bahan bisa dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Bahan Antena.

Bahan	Kelebalan(mm)	Permitivitas <i>Relative</i> (ϵ_r)
Tembaga (<i>Copper</i>)	0,035	1
Dielektrik(FR-4 Epoxy)	1,6	4,3

2.3. Perhitungan Antena *circular*

Pada perancangan antena terdapat penentuan dimensi elemen peradiasi terlebih dahulu harus direncanakan berapa nilai frekuensi kerja yang diinginkan (f_r), yaitu 2400 MHz → 2,4 GHz dengan nilai perambatan nilai bebas (c) sebesar 3×10^8 m/s, dengan menggunakan persamaan :

Kemudian dihitung besarnya radius (a) elemen peradiasi antena *microstrip* dengan persamaan berikut

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \frac{\pi F}{2h} \right] + 1,7726 \right\}^{1/2}} \text{ (cm)} \quad (1)$$

Mencari F dengan persamaan (2.7) berikut:

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{fc\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Untuk elemen peradiasi dengan frekuensi 2,4 GHz, didapatkan nilai dengan persamaan:

$$y_0 = 0,3d \quad (3)$$

Untuk perhitungan dimensi saluran transmisi *microstrip* dapat digunakan persamaan di bawah ini

$$W_0 = \frac{377}{Z_0} \times \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (mm)} \quad (4)$$

Sedangkan panjang saluran transmisi dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_0 = \frac{1}{4} \lambda_d \text{ (m)} \quad (5)$$

Lalu untuk menghitung saluran pencatu L dengan persamaan di bawah:

$$\beta = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

$$D = \frac{2h}{\pi} \left(\beta - 1 - \ln(2\beta - 1) \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(\beta - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \quad (7)$$

Panjang saluran pencatu L, dilakukan dengan persamaan:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right) \quad (8)$$

Setelah itu sisi panjang efektif di *feedline* pada sisi tepi peradiasi diperluas dengan penambahan ΔL seperti yang terlihat pada persamaan sebelum itu cari λ_0 menggunakan persamaan :

$$\Delta L = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{9}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \tag{10}$$

Dari persamaan di atas diperoleh L

$$L = \frac{\Delta L}{4} \tag{11}$$

Tabel 3. Tabel Dimensi Ukuran dari *Patch* Antena Mikrostrip (Sebelum Optimasi).

Nama	Nilai(mm)	Deskripsi
a	17,65	<i>Patch</i>
lo	14,7	Panjang <i>feedline</i> 50 ohm
Yo	1,035	Jarak slot
wo	1,45	Lebar <i>feedline</i> 50 ohm

Pada tabel 3 terlampir dimensi dari ukuran *patch*, panjang *feedline*, jarak slot, dan lebar *feedline*. Ukuran ini didapatkan menggunakan persamaan matematis (1) – (11).

Tabel 3. Parameter Hasil Optimasi.

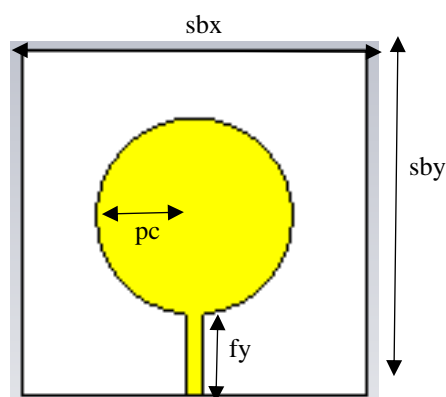
Nama	Nilai(mm)	Deskripsi
sbx	60	Lebar <i>Substrat</i> dan <i>Ground</i>
sby	60	Panjang <i>Substrat</i> dan <i>Ground</i>
pc	17,05	<i>Patch</i>
fx	3,1	Lebar <i>Feedline</i>
fy	35	Panjang <i>Feedline</i>
sbh	1,6	Ketebalan <i>Substrat</i> (fr-4)
ph	0,035	Ketebalan <i>Patch</i> (Copper)

Pada tabel 4 terlampir spesifikasi ukuran antena mikrostrip setelah optimasi. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan spesifikasi antena merujuk ke tabel 1 setelah sebelumnya hasil simulasi dari ukuran pada tabel 3 hasilnya belum mencukupi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Antena *Microstrip Circular*

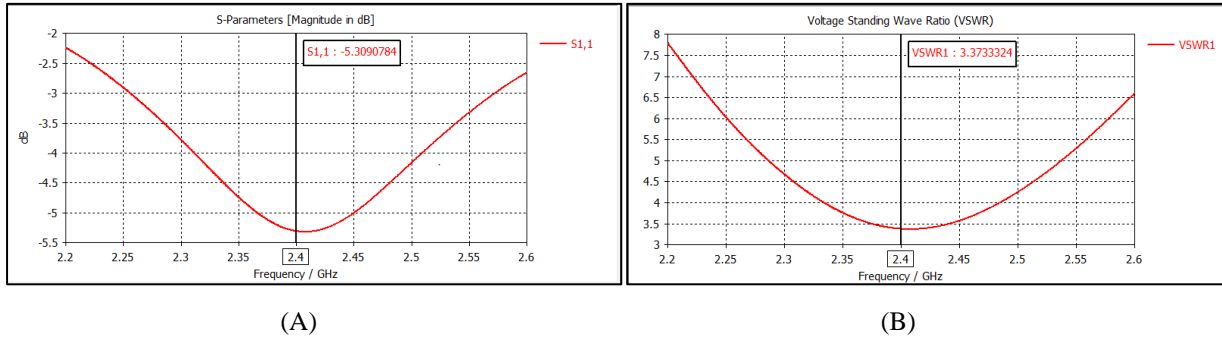
Berikut ini hasil antena *circular* yang sudah di optimasi, dengan ukuran yang sesuaikan, dan untuk hasil pada gambar 2 terdapat pada tabel 4.



Gambar 2. Desain Antena *Circular*.

3.1.1. Hasil S-Parameter dan VSWR

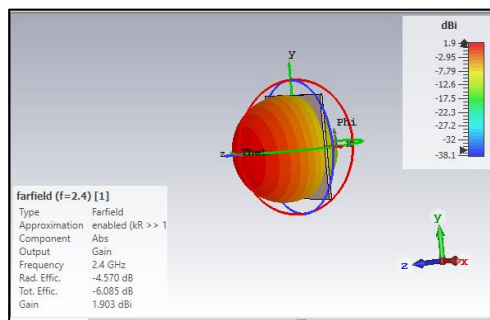
Dari hasil simulasi dengan aplikasi CST *Studio Suite* 2019 pada frekuensi 2,4 GHz dengan S_{11} (*return loss*) -5,3 tanpa adanya *bandwidth*. Lalu hasil yang didapatkan dari VSWR adalah di 3,37. Nilai tersebut tidak sesuai dengan standar yang diinginkan dan tidak memenuhi kriteria standar yang menetapkan VSWR harus dibawah 2.



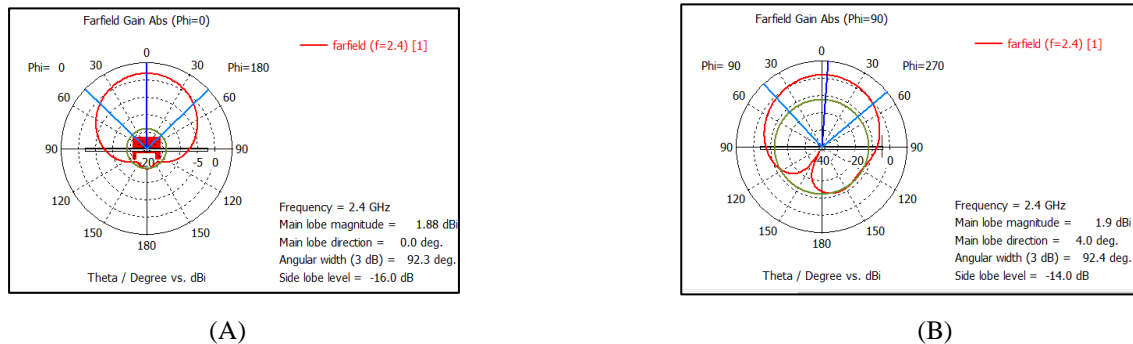
Gambar 3. S-Parameter Antena *Circular*.

3.1.2. Hasil Pola Radiasi dan Gain

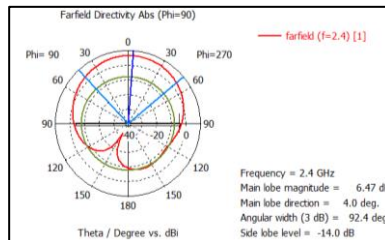
Dari hasil yang didapatkan untuk *gain* dan polarisasi dari sudut elevasi dan *azimuth* seperti pada gambar 5.



Gambar 4. Hasil *Farfield Gain*.



Gambar 5. (A) Azimuth, dan (B) Elevasi *Microstrip Circular*.

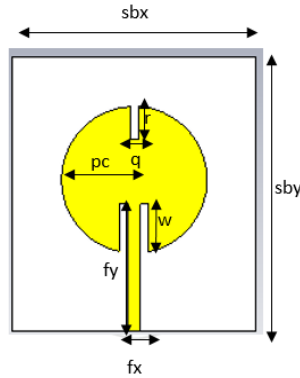


Gambar 6. Hasil *Directivity* Antena *Circular*.

Nilai yang didapatkan *gain* untuk antena *circular* adalah 1,9 dBi dan dari yang dihasilkan untuk sudut *azimuth* 1,88 dBi, elevasi 1,9 dBi, dan untuk *directivity* 6,47 dBi.

3.2. Antena *Microstrip Circular* Axe

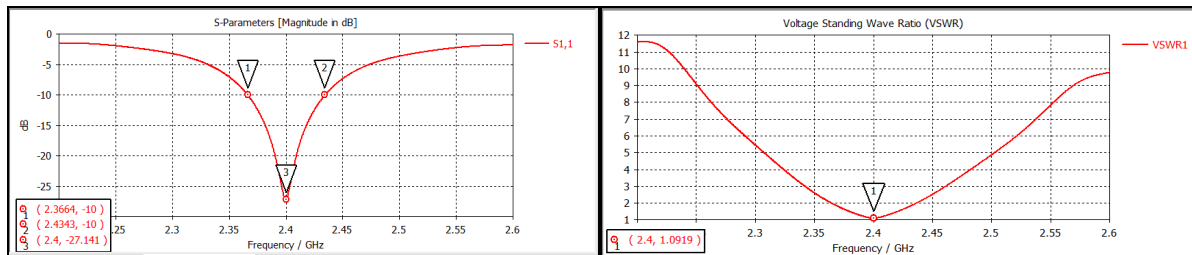
Dikarenakan antena yang tidak sesuai dengan yang diinginkan yaitu *return loss* turun pada frekuensi 2,4 GHz, maka dilakukan optimasi dengan tujuan mendapatkan frekuensi yang diinginkan, dan hasilnya antena *circular* ditambahkan beberapa slot dan membentuk seperti kapak (*axe*) yang dimana bertujuan untuk mendapatkan S_{11} yang baik dan sesuai standar.



Gambar 7. Desain Antena *Circular Axe*.

3.2.1. Hasil S-Parameter dan VSWR

Dari hasil yang sudah disimulasikan didapatkan pada frekuensi 2,4 GHz dengan S_{11} (*return loss*) -27,141 dengan *bandwidth* 67,9 MHz. Lalu hasil yang didapatkan dari VSWR adalah di 1,091 pada frekuensi 2,4 GHz. Nilai VSWR pada frekuensi 2,4 GHz telah mencapai atau bahkan lebih baik dari nilai yang diinginkan yaitu kurang dari atau sama dengan $\leq 1,5$. Hal ini menunjukkan antena telah berhasil di atur dengan baik mencapai performa yang sesuai standar dan mengurangi efek *return loss* pada frekuensi tersebut.

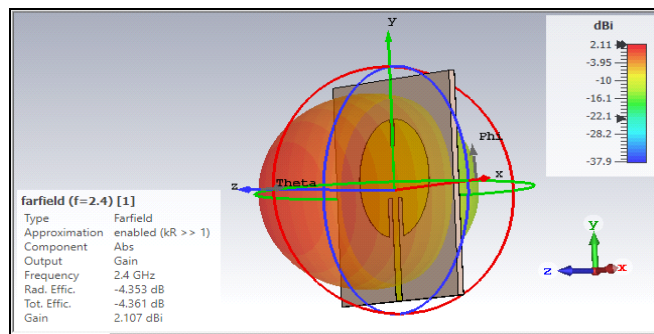


(A) (B)

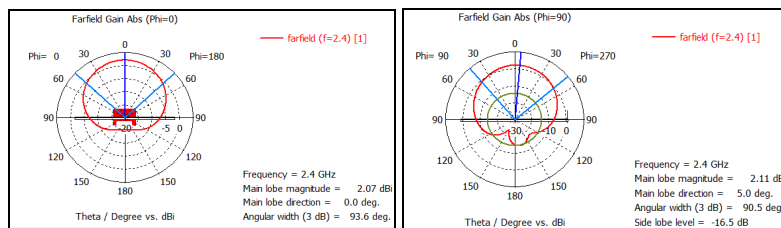
Gambar 8. (A) S-Parameter, dan (B) VSWR Antena *Circular Axe*.

3.2.2. Hasil Pola Radiasi dan Gain Antena *Circular Axe*

Dari hasil yang didapatkan untuk *gain* dan polarisasi dari sudut elevasi dan *azimuth* seperti pada gambar 10.

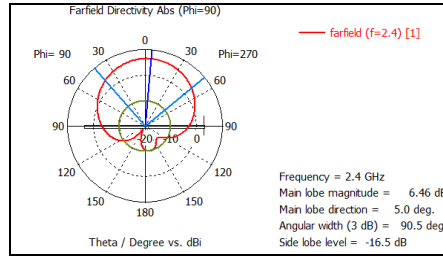


Gambar 9. Hasil *Farfield Gain* Antena *Circular Axe*.



(A) (B)

Gambar 10. (A) *Azimuth*, dan (B) *Elevasi Microstrip* Antena *Circular Axe*.

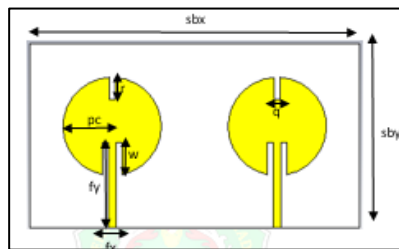


Gambar 11. Hasil *Directivity* Antena *Circular Axe*.

Nilai yang didapatkan *gain* untuk antena *circular* adalah 2,107 dBi dan dari yang dihasilkan untuk sudut *azimuth* 2,07 dBi dan elevasi 2,11 dBi dan *directivity* 6,45 dBi. Dalam percobaan sudah dilihat hasil dari *azimuth* dan elevasi pada gambar 10 yang mana *azimuth* disebut juga sudut horizontal (datar) antara arah hadap dari antena dan objek yang ingin ditangkap pengukuran *azimuth* biasanya dilakukan pada nol derajat (0°), pola radiasi *azimuth* berbentuk omnidireksional, yaitu radiasi merata di sekitar antena. Lalu untuk elevasi disebut juga sudut vertikal dengan mengukur ketinggian suatu objek terhadap suatu titik referensi. Pola radiasi elevasi berbentuk *isotropic* yaitu merata ke segala arah, dan *derecivity* disebut juga dengan ukuran dari kemampuan antena untuk mengarahkan daya radiasi ke arah tertentu yang mana pada gambar 11 hasil yang didapatkan 6,46 dBi.

3.3. Antena MIMO *Circular Axe*

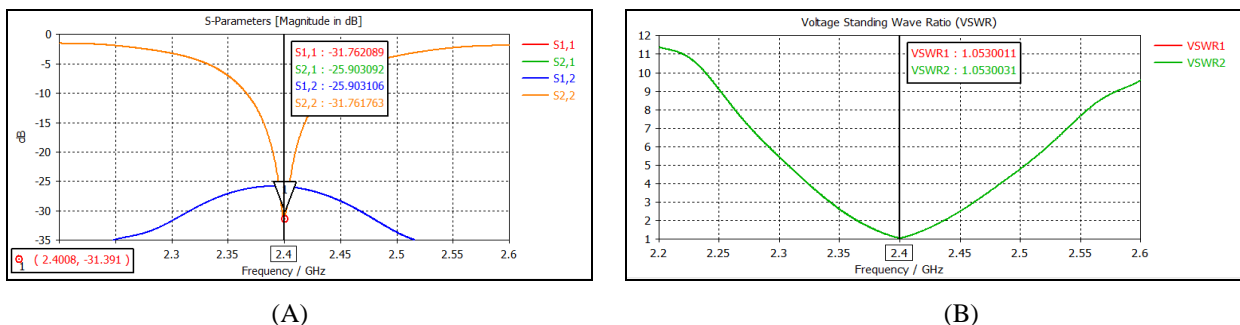
Dikarenakan belum mendapatkan hasil yang diinginkan maka dari itu dalam percobaan ini untuk melihat apakah terjadi perubahan bila antena dijadikan MIMO.



Gambar 12. Desain Antena *Circular Axe* MIMO.

3.3.1. Hasil S-Parameter

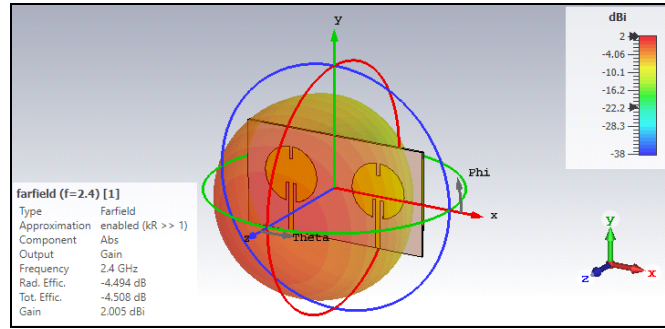
Dari hasil yang sudah disimulasikan didapatkan pada frekuensi 2,4GHz dengan S_{11} (*return loss*) -27,141 dan S_{21} (*insertion loss*) -25,903 dengan *bandwidth* 67,9 MHz. Lalu hasil yang didapatkan dari VSWR adalah di 1,053 pada frekuensi 2,4 GHz. Nilai VSWR pada frekuensi 2,4 GHz telah mencapai atau bahkan lebih baik dari nilai yang diinginkan yaitu kurang dari atau sama dengan $\leq 1,5$. Hal ini menunjukkan antena telah berhasil di atur dengan baik mencapai performa yang sesuai standar dan mengurangi efek *return loss* pada frekuensi tersebut.



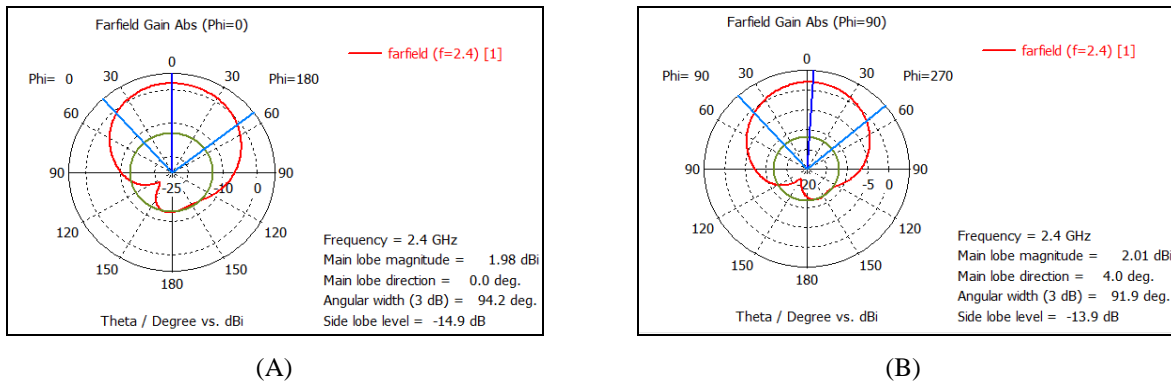
Gambar 13. (A) S-Parameter, dan (B) VSWR Antena *Circular Axe* MIMO.

3.3.2. Hasil Pola Radiasi dan *Gain* Antena MIMO *Circular Axe*

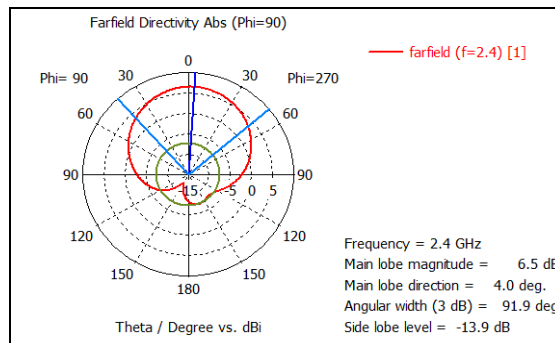
Dari hasil yang didapatkan untuk *gain* dan polarisasi dari sudut *elevasi* dan *azimuth* seperti pada gambar 15.



Gambar 14. Hasil *Farfield Gain* Antena *Circular Axe* MIMO.



Gambar 15. (A) Azimuth, dan (B) Elevasi *Microstrip* Antena *Circular Axe* MIMO.

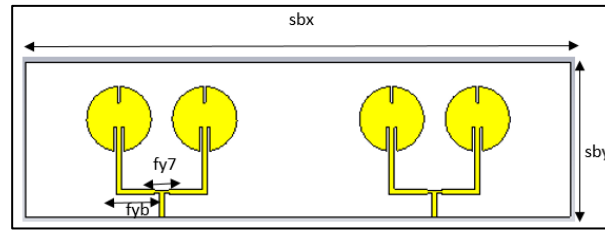


Gambar 16. Hasil *Directivity* Antena *Circular Axe* MIMO.

Nilai yang didapatkan *gain* untuk antena *circular axe* MIMO adalah 2,005 dBi dan dari yang dihasilkan untuk sudut *azimuth* 1,98 dBi dan elevasi 2,01 dBi dan *directivity* 6,5 dBi. Dalam percobaan sudah dilihat hasil dari *azimuth* dan *elevasi* pada gambar 15 yang mana *azimuth* disebut juga sudut horizontal (datar) antara arah hadap dari antena dan objek yang ingin ditangkap pengukuran *azimuth* biasanya dilakukan pada nol derajat(0°), pola radiasi *azimuth* berbentuk omnidireksional, yaitu radiasi merata di sekitar antena. Lalu untuk *elevasi* disebut juga sudut vertikal dengan mengukur ketinggian suatu objek terhadap suatu titik referensi. Pola radiasi *elevasi* berbentuk *isotropic* yaitu merata ke segala arah, dan *directivity* disebut juga dengan ukuran dari kemampuan antena untuk mengarahkan daya radiasi ke arah tertentu yang mana pada gambar 16 hasil yang didapatkan 6,5 dBi.

3.4. Antena Array MIMO 1×2 *Circular Axe*

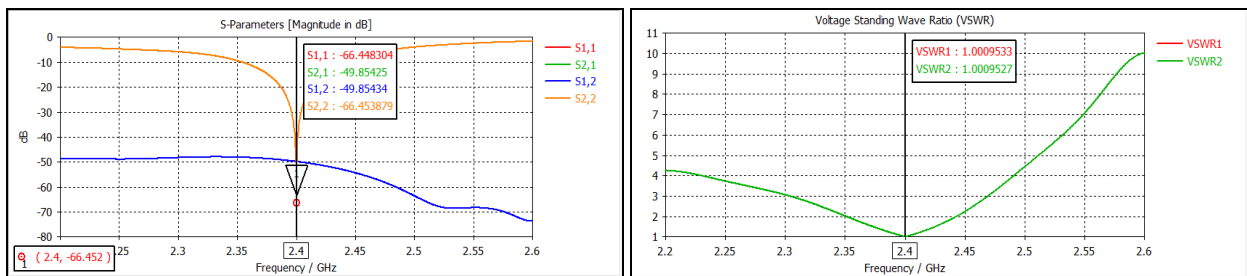
Dikarenakan masih belum mendapatkan hasil yang diinginkan sesuai dengan yang telah dipelajari di teori bila ditambahkan *patch* atau di *array* kan itu akan menambah *gain*.



Gambar 17. Desain Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe.

3.4.1. Hasil S-Parameter

Dari hasil yang sudah disimulasikan didapatkan pada frekuensi 2,4 GHz dengan S_{11} (*return loss*) -22,8 dan S_{21} (*insertion loss*) -39,772 dengan *bandwidth* 75,8 MHz. Lalu hasil yang didapatkan dari VSWR adalah di 1,156 pada frekuensi 2,4 GHz. Nilai VSWR pada frekuensi 2,4 GHz telah mencapai atau bahkan lebih baik dari nilai yang diinginkan yaitu kurang dari atau sama dengan $\leq 1,5$. Hal ini menunjukkan antena telah berhasil di atur dengan baik mencapai performa yang sesuai standar dan mengurangi efek *return loss* pada frekuensi tersebut



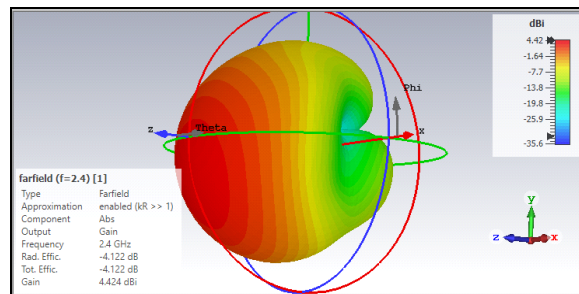
(A)

(B)

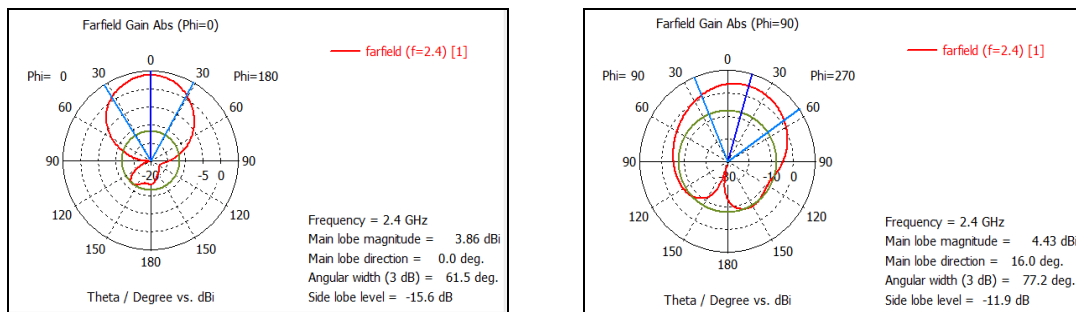
Gambar 18. S-Parameter Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe.

3.4.2. Hasil Pola Radiasi dan Gain Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe

Dari hasil yang didapatkan untuk *gain* dan polarisasi dari sudut elevasi dan *azimuth* seperti pada gambar 20.



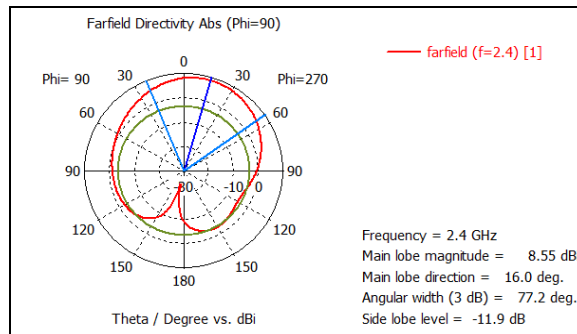
Gambar 19. Hasil Farfield Gain Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe.



(A)

(B)

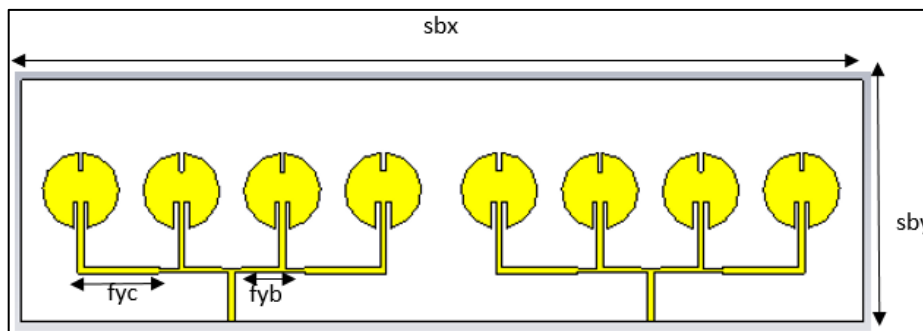
Gambar 20. (A) Azimuth, dan (B) Elevasi Microstrip Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe.



Gambar 21. Hasil Directivity Antena Array MIMO 1×2 Circular Axe.

Nilai yang didapatkan *gain* untuk antena array MIMO 1×2 circular axe adalah 4,31 dBi dan dari yang dihasilkan untuk sudut *azimuth* 3,64 dBi dan *Elevasi* 4,32 dBi. Dalam percobaan sudah dilihat hasil dari *azimuth* dan elevasi pada gambar 20 yang mana *azimuth* disebut juga sudut horizontal (datar) antara arah hadap dari antena dan objek yang ingin ditangkap pengukuran *azimuth* biasanya dilakukan pada nol derajat (0°), pola radiasi *azimuth* berbentuk omnidireksional, yaitu radiasi merata di sekitar antena. Lalu untuk *elevasi* disebut juga sudut vertikal dengan mengukur ketinggian suatu objek terhadap suatu titik referensi. Pola radiasi *elevasi* berbentuk isotropic yaitu merata ke segala arah, dan *derektivitas* disebut juga dengan ukuran dari kemampuan antena untuk mengarahkan daya radiasi ke arah tertentu yang mana pada gambar 21 hasil yang didapatkan 8,55 dBi.

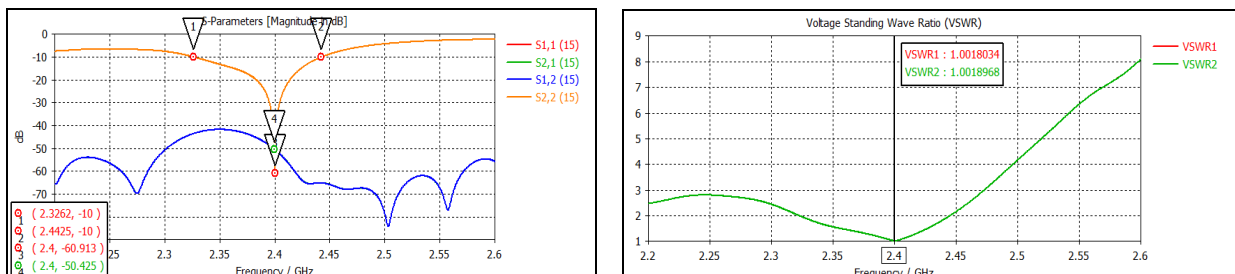
3.5. Antena Array MIMO 1×4 Circular Axe



Gambar 22. Desain Antena Array MIMO 1×4 Circular Axe.

3.5.1. Hasil S-Parameter

Dari hasil yang sudah disimulasikan didapatkan pada frekuensi 2,4GHz dengan S_{11} (*return loss*) -60,913 dan S_{21} (*insertion loss*) -50,425 dengan *bandwidth* 116,3 MHz. Lalu hasil yang didapatkan dari VSWR adalah di 1,001 pada frekuensi 2,4 GHz. Nilai VSWR pada frekuensi 2,4 GHz telah mencapai atau bahkan lebih baik dari nilai yang diinginkan yaitu kurang dari atau sama dengan $\leq 1,5$. Hal ini menunjukkan antena telah berhasil di atur dengan baik mencapai performa yang sesuai standar dan mengurangi efek *return loss* pada frekuensi tersebut.



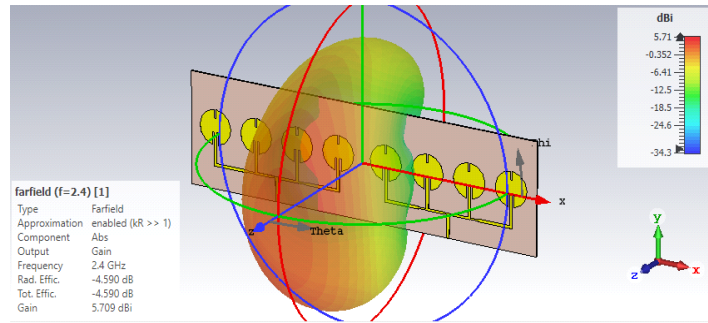
(A)

(B)

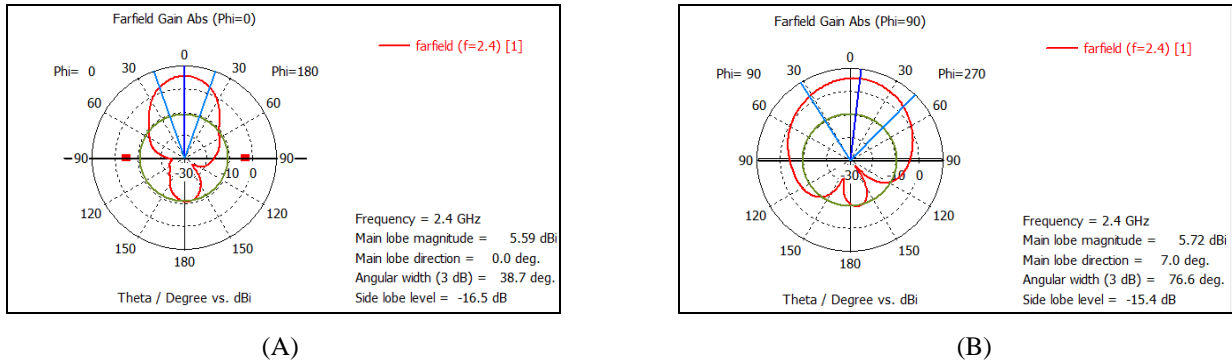
Gambar 23. S-Parameter Antena Array MIMO 1×4 Circular Axe.

3.5.2. Hasil Pola Radiasi dan Gain Antena Array MIMO 1×4 Circular axe

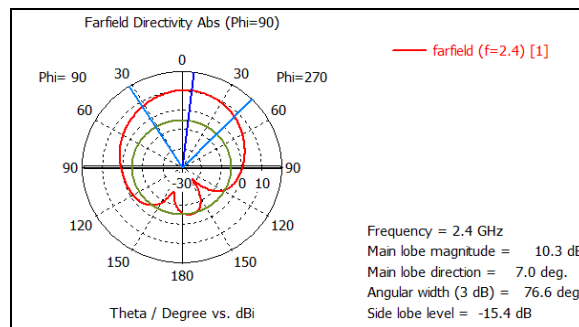
Dari hasil yang didapatkan untuk *gain* dan polarisasi dari sudut elevasi dan *azimuth* seperti pada gambar 25.



Gambar 24. Hasil *Farfield Gain* Antena Array MIMO 1×4 *Circular Axe*.



Gambar 25. (A) *Azimuth*, dan (B) *Elevasi* *Microstrip* Antena Array MIMO 1×4 *Circular Axe*.



Gambar 26. Hasil *Directivity* Antena Array MIMO 1×4 *Circular Axe*.

Nilai yang didapatkan *gain* untuk antena array MIMO 1×4 *circular axe* adalah 5,709 dBi dan dari yang dihasilkan untuk sudut *azimuth* 5,59 dBi dan elevasi 5,72 dBi. Dalam percobaan sudah dilihat hasil dari *azimuth* dan elevasi pada gambar 25 yang mana *azimuth* disebut juga sudut horizontal (datar) antara arah hadap dari antena dan objek yang ingin ditangkap pengukuran *azimuth* biasanya dilakukan pada nol derajat (0°), pola radiasi *azimuth* berbentuk omnidireksional, yaitu radiasi merata di sekitar antena. Lalu untuk elevasi disebut juga sudut vertikal dengan mengukur ketinggian suatu objek terhadap suatu titik referensi. Pola radiasi elevasi berbentuk *isotropic* yaitu merata ke segala arah, dan *directivity* disebut juga dengan ukuran dari kemampuan antena untuk mengarahkan daya radiasi ke arah tertentu yang mana pada gambar 26 hasil yang didapatkan 10,3 dBi.

3.6. Hasil Percobaan pada simulasi CST

Dari hasil percobaan yang sudah dilakukan telah didapatkan frekuensi kerja dan spesifikasi parameter yang diinginkan dengan mengubah beberapa parameter seperti nilai dari *substrat*, *feeder*, *patch*, dan ukuran dari slot tambahan. Dalam beberapa tahap dari mulai *single circular – array* MIMO 1×4 untuk mendapatkan hasil yang diinginkan pada tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5. Parameter Hasil Percobaan.

Parameter	Single Circular	Single axe	MIMO Single axe	Array MIMO 1×2 axe	Array MIMO 1×4 axe
Frekuensi(GHz)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Return loss (dB)	-5,309	-27,141	-31,762	-66,44	-60,913
Insertion loss (dB)	0	0	-25,903	-49,85	-50,425
VSWR	3,37	1,0919	1,053	1,0009	1,001
Bandwidth (MHz)	0	67,9	68,3	86,4	116,3
Gain (dBi)	1,9	2,107	2,005	4,42	5,709

Dalam awal percobaan antena *single circular* yang belum ditambahkan slot sangatlah sulit untuk mendapatkan hasil S_{11} , VSWR, *gain*, dan *bandwidth* yang sesuai dengan spesifikasi pada frekuensi 2,4 GHz. Setelah percobaan antena *single circular axe* masih belum mendapatkan hasil yang diinginkan maka ditambahkan sebuah slot dan di optimasi kembali seluruh parameter. Lalu setelah di amati dari perubahan akhirnya didapatkan hasil dengan S_{11} bernilai -27,141 dB, VSWR bernilai 1,0919, *bandwidth* 67,9 MHz, dan *gain* 2,107 dB. Hal ini terjadi karena perubahan impedansi yang berasal dari perubahan slot akan mempengaruhi medan elektromagnetik.

Selanjutnya mengenai hasil dari antena *single circular axe* belum mendapatkan hasil *bandwidth* yang diinginkan lalu membuat sebuah antena *single circular MIMO axe* untuk melihat perubahan yang terjadi, dan terlihat hasilnya dengan S_{11} bernilai -31,762 dB, S_{21} bernilai -25,903 dB, VSWR bernilai 1,053, *bandwidth* 68,3 MHz, dan *gain* 2,005 dB. Dari hasil yang diamati bahwa nilai S_{11} , VSWR dan *bandwidth* bertambah sedangkan *gain* mengurang karena terjadi saat perubahan dari *single axe* ke MIMO, *single axe* terjadi pada *bandwidth* bertambah karena masing-masing elemen antena beroperasi secara independen pada frekuensi yang sama maupun berbeda, kemudian *gain* menurun dikarenakan yang awalnya antena *single* biasanya lebih tinggi karena fokus daya sinyal ke arah tertentu lalu berpindah ke antena *single MIMO* terdapat beberapa elemen fisik yang beroperasi bersamaan dan setiap elemen membagi kontribusi pada pemancar dan penerima secara bersamaan.

Percobaan berlanjut dengan penambahan 1 *patch* menjadi antena *circular array MIMO 1×2 axe* yang bertujuan menambah *bandwidth* dan *gain* dan terlihat hasil yang dapatkan dengan *gain* menjadi 4,42 dB dan *bandwidth* menjadi 86,4 MHz. Berikut ini terjadi karena penggunaan *array MIMO* dengan dua elemen antena memungkinkan adanya pola radiasi yang lebih fokus dan efisien dibandingkan antena *MIMO single*.

Kemudian untuk mencapai hasil yang sesuai ditambahkan 2 *patch* menjadi antena *circular array MIMO 1×4 axe*, lalu hasil terlihat sesuai spesifikasi dengan nilai S_{11} bernilai -60,913 dB, S_{21} bernilai -50,425 dB, VSWR bernilai 1.001, *bandwidth* 116,3 MHz, dan *gain* 5,709 dB.

3.7. Hasil Antena yang sudah Difabrikasi

Dari Simulasi yang telah dilakukan dan didapatkan hasil antena *array MIMO 1×4* dengan menggunakan *patch circular axe* dengan frekuensi kerja, S_{11} , S_{21} , VSWR, dan *bandwidth* yang sesuai dengan spesifikasi. Selanjutnya dilakukan fabrikasi untuk mengetahui perbandingan dengan antena yang sudah disimulasikan dengan menggunakan VNA (*Vector Network Analyzer*).



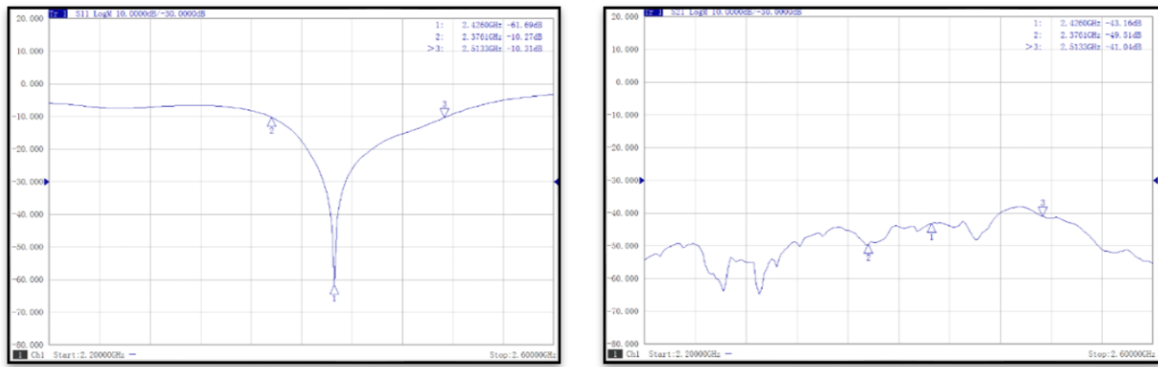
Gambar 27. Tampilan Antena dari Depan (A), dan Belakang (B).

Antena yang sudah difabrikasi akan dilakukan pengecekan dengan menggunakan VNA (*Vector Network Analyzer*) untuk mengetahui hasil dari antena seperti frekuensi kerja, S_{11} , S_{21} , VSWR, *bandwidth*, dan pola radiasi.

3.8. Hasil Pengukuran Antena yang Telah Difabrikasi.

3.8.1. Hasil S-Parameter

Berikut hasil pengukuran S-Parameter yang di dalamnya terdapat *return loss* dan *bandwidth* dengan menggunakan alat ukur VNA yang mana dengan *range* 2,2 GHz sampai 2,6 GHz dengan frekuensi tujuan 2,4 GHz.



Gambar 28 Hasil Pengukuran S-Parameter S_{11} dan S_{21} .

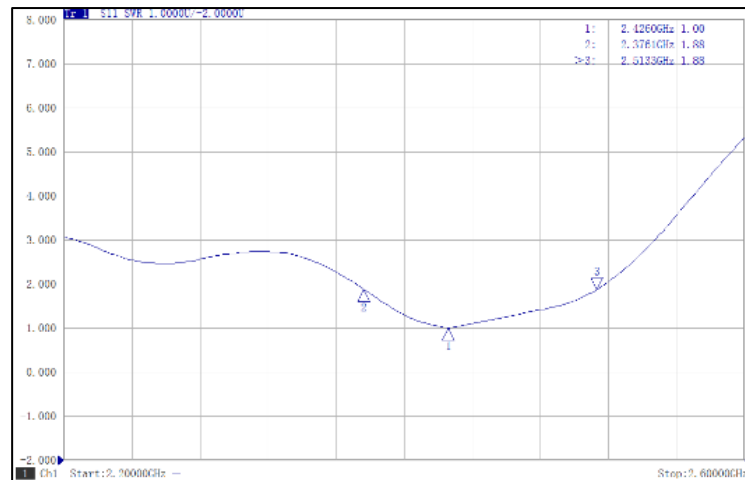
Tabel 6. Hasil Pengukuran S-Parameter.

S-Parameter	S_{11}	S_{21}
Frekuensi (GHz)	2,4260	2,4260
Return loss (dB)	-61,69	-
Insertion loss (dB)	-	-43,16

Hasil yang sudah di dapat terdapat pada tabel 6 yang mana terjadi pergeseran cukup signifikan dari hasil simulasi 2,4 GHz dan pada pengukuran 2,4260 GHz dengan *bandwidth* yang didapatkan sebesar 137,2 MHz

3.8.2. Hasil VSWR

Selanjutnya merupakan gambar hasil dari pengukuran VSWR yang menggunakan alat VNA dan dengan *range* 2,2 GHz sampai 2,6 GHz dengan frekuensi tujuan 2,4 GHz.

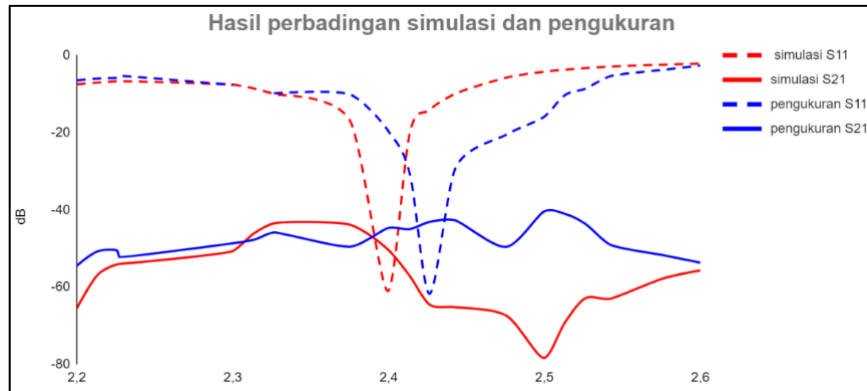


Gambar 29. Hasil VSWR.

Dari pengukuran yang telah dilakukan didapatkan hasil VSWR menggunakan VNA dengan frekuensi 2,4260 GHz yang didapatkan VSWR sebesar 1,00.

3.9. Hasil Analisis

Setelah dilakukan pengukuran S-Parameter dan VSWR antena dengan menggunakan VNA didapatkan tabel perbandingan hasil simulasi dan pengukuran yang terdapat pada tabel 7 dan gambar 30.



Gambar 30. Hasil Perbandingan Simulasi dan Pengukuran.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Simulasi dan Pengukuran.

Parameter	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi(GHz)	2,4	2,4260
Returnloss(dB)	-60,913	-61,69
Insertion loss(dB)	-50,425	-43,16
VSWR	1,001	1,00
Bandwidth(MHz)	116,3	137,2

Dari hasil yang sudah dilakukan dengan menggunakan alat VNA terdapat perbedaan dari hasil walaupun sama menggunakan *range* frekuensi dari 2,2 - 2,6 GHz. Dari hasil simulasi diperoleh pada frekuensi 2,4 GHz *return loss* -60,913 dB, *insertion loss* -50,452 dB sedangkan untuk pengukuran *return loss* -61,69 dB, *insertion loss* -43,16 dB pada frekuensi 2,4260 GHz. Selanjutnya pada bagian VSWR yang mana pada simulasi antena memperoleh 1,001 sedangkan pengukuran untuk mendapatkan 1,00. kemudian untuk *bandwidth* yang didapatkan pada simulasi 116,3 MHz sedangkan untuk simulasi sebesar 137,2 MHz.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan frekuensi 2,4 GHz didapatkan hasil sebagai berikut: dalam penelitian perancangan antena *array* MIMO 1x4 dengan variasi dimensi elemen *patch circular*, *axe*, dan *array*, disimpulkan bahwa perubahan dimensi memiliki dampak signifikan terhadap parameter antena MIMO. Penyesuaian dimensi elemen-elemen tersebut mengakibatkan variasi dalam *return loss* (S_{11}), *insertion loss* (S_{21}), VSWR, *bandwidth*, pola radiasi, dan *gain*. Oleh karena itu, optimisasi dimensi elemen-elemen antena menjadi kritis guna mencapai performa antena *array* MIMO 1×4 yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang diinginkan. Selanjutnya hasil yang didapatkan dari pengukuran antena *microstrip array* MIMO 1×4 *patch axe* dengan frekuensi yang didapat *return loss* (S_{11}) -61,69 dB, *insertion loss* (S_{21}) -43,16 dB, VSWR 1,00 dan *bandwidth* 137,2 MHz pada frekuensi 2,4260 GHz. Frekuensi bergeser sebesar 260 MHz dari hasil simulasi, walaupun begitu hasil dari pengukuran untuk parameter yang diukur sudah sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan.

Daftar Notasi

MIMO	=	Multiple-Input Multiple-Output
VSWR	=	Voltage Standing Wave Ratio
WiFi	=	Wireless Fidelity
dB	=	Decibel
FC	=	Frekuensi Center
FDTD	=	Finite-Difference Time-Domain
dBi	=	Decibel Isotropic
MHZ	=	Mega Hertz
VNA	=	Vector Network Analyzer

Daftar Pustaka

- Authors, P. (2018). *To Secure Your Paper As Per UGC Guidelines We Are Providing A Electronic DESIGN AND ANALYSIS OF 2 × 2 CIRCULAR MICRO-STRIP PATCH ANTENNA ARRAY FOR 2 . 4 GHZ WIRELESS COMMUNICATION APPLICATION. 07.*
- Bagus, I., Wily, N., Elektro, J. T., Teknik, F., Malang, U. B., Dahlan, E. A., & Kurniawan, D. F. (2003). *PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ANTENA MIKROSTRIP CIRCULAR PATCH ARRAY EMPAT ELEMEN*

DENGAN KONFIGURASI SYMMETRY PARALLEL FEED NETWORK UNTUK FREKUENSI KERJA 2 , 4 GHz.

- Budi, I. M. P., Nugraha, E. S., & Agung, A. (2017). Perancangan Dan Analisis Antena Mikrostrip Mimo Circular Pada Frekuensi 2.35 GHz Untuk Aplikasi LTE. *Jurnal Infotel*, 9(1), 136. <https://doi.org/10.20895/infotel.v9i1.130>
- Emilia, R., & Mujirudin, M. (2013). Sistem Mimo dan Aplikasi Penggunaannya. *Rekayasa Teknologi*, 6(6), 14–20.
- Faroqi, A., Zaelani, F., Kariadinata, R., & Ramdhani, M. A. (2018). On the Design of Array Microstrip Antenna with S-Band Frequency for Radar Communication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 288(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012006>
- Fitri Amillia, Eko Setijadi, & Gamantyo Hendrantoro. (2023). Subarray 4×4 untuk Antena MIMO 5G dengan Elemen yang Menerapkan Teknik Parasitic. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 12(1), 8–14. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v12i1.5310>
- Hidayat, M. R., Permana, R. A., & Sambasri, S. (2021). Konversi Antena Mimo 2x2 Frekuensi 2,4 Ghz Menjadi 5,5 Ghz Menggunakan Patch Bowtie Berbasis Dual Slot Segi Empat dan Single Slot Segitiga. *TELKA - Telekomunikasi Elektronika Komputasi dan Kontrol*, 7(2), 161–173. <https://doi.org/10.15575/telka.v7n2.161-173>
- Indarwati, Ika Puspita, dan A. D. A. (2022). *Electrical and Telecommunication Journal (ELTEC) Vol. 3, No. 2, Desember 2022*. 3(2), 1–15.
- Muhidin, A. K., Madiawati, H., Sulaeman, Y., & Kunci, K. (2020). *Desain Antena MIMO 2x2 Patch Rectangular untuk Komunikasi 5G pada Frekuensi 3 , 5 GHz dengan Peningkatan Gain Menggunakan Akrilik*. 26–27.
- Nafiza, N., Sreeja, B. S., Devi, R. C., & Radha, S. (2016). Novel axe-shaped circular microstrip quad band antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(2), 399–402. <https://doi.org/10.1002/mop.29572>
- Natasya, U., Marpaung, J., Kusumawardhani, E., Imansyah, F., & Putra, A. S. L. (2022). *RANCANGAN SIMULASI DAN OPTIMASI ANTENA MIKROSTRIP DIPOLE 4 ELEMEN PADA FREKUENSI 2.4 GHz*. 2016.
- Sugiarto, S. K., Mujahidin, I., & Setiawan, A. B. (2019). 2,5 GHz Antena Mikrostrip Polarisasi Circular Model Patch Yin Yang untuk Wireless Sensor. *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, 4(2), 297–300. <https://doi.org/10.32486/jeecae.v4i2.388>

Karakterisasi Asam Lemak dan Aktivitas Antioksidan Minyak Hasil Ekstraksi Biji Kelor

Lidya Risang Ayu¹, Lienda Aliwarga¹, dan Sanggono Adisasmito¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

lidyarisang@gmail.com, lienda@itb.ac.id, sanggono@itb.ac.id

Abstrak

Keanekaragaman tumbuhan yang menjadi sumber minyak nabati tumbuh subur di Indonesia, menjadikan Indonesia berpotensi sebagai negara penghasil minyak nabati yang besar. Tanaman kelor merupakan salah satu tanaman yang digadang-gadang sebagai potensi baru sebagai tanaman penghasil minyak nabati. Biji dari tanaman kelor yang mengandung 35-40% minyak, dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti industri farmasi, kosmetik, dan otomotif. Asam lemak jenuh yang terkandung meliputi asam oleat, asam palmitat, asam stearat, asam behenat, dan asam arakidat yang bermanfaat untuk kesehatan. Minyak biji kelor juga mengandung antioksidan, anti mikroba, vitamin C, vitamin E, vitamin B1 dan B2. Pengambilan minyak dari biji kelor pada penelitian ini menggunakan metode pengepresan mekanis dengan kadar air biji kelor 8 dan 16% b/b. Temperatur pengepresan divariasikan pada 80°C, 100°C, dan 120°C. Karakterisasi komposisi asam lemak minyak biji kelor diperoleh dengan kandungan asam lemak yaitu asam oleat 74,6–79,9%, asam palmitat sebesar 5,77–7,78%, asam stearat 4,71–5,48%, asam behenat 4,83–8,71%, dan asam arakidat sebesar 2,76–6,5%. Aktivitas antioksidan tertinggi diperoleh pada kondisi temperatur pengepresan 80°C dengan kandungan kadar air biji kelor 8%, menghasilkan nilai IC₅₀ sebesar 67,4 ppm yang termasuk dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan kuat.

Kata kunci: pres mekanik, minyak kelor, asam lemak, aktivitas antioksidan

Abstract

Diversity of plants that are sources of vegetable oil grows abundantly in Indonesia, making Indonesia have potential to become a large vegetable oil-producing country. Moringa plant is one of plants predicted to have new potential as a vegetable oil-producing plant. The seeds of Moringa plant, which contain 35–40% oil, are used for various purposes such as pharmaceutical, cosmetic, and automotive industries. Saturated fatty acids contained oleic acid, palmitic acid, stearic acid, behenic acid, and arachidic acid which are beneficial for health. Moringa seed oil also contains antioxidants, antimicrobials, and vitamins C, E, B1, and B2. Oil extraction from Moringa seeds in this study used mechanical pressing method with moisture content of Moringa seeds 8 and 16% w/w. The pressing temperature varied at 80°C, 100°C, and 120°C. Characterization of fatty acid composition of Moringa seed oil was obtained by fatty acid content of 74.6–79.9% oleic acid, 5.77–7.78% palmitic acid, 4.71–5.48% stearic acid, 4.83–8.71% behenic acid, and 2.76–6.5% arachidic acid. Highest antioxidant activity was obtained at a pressing temperature of 80°C with a moisture content of 8% Moringa seeds, resulting in an IC₅₀ value of 67.4 ppm which is included in compounds with strong antioxidant activity.

Keywords: mechanical press, moringa oil, fatty acid, antioxidant activity

1. Pendahuluan

Minyak nabati, minyak yang diperoleh dari bagian tumbuhan yang dimanfaatkan menjadi bahan baku pelumas, bahan pewangi, obat-obatan, bahan bakar, keperluan pangan, kosmetik, hingga keperluan industri. Minyak nabati kaya akan trigliserida dan mengandung asam lemak dan mikronutrien seperti tokoferol, fosfolipid, sterol, karotenoid, dan kandungan mikronutrien lainnya (Wen dkk., 2022). Tingkat pertumbuhan tahunan global permintaan minyak nabati sebesar 5,14% dari tahun 2020 hingga tahun 2025 (Wen dkk., 2022). Apabila dibandingkan dengan minyak hewani, minyak nabati lebih populer karena pemanfaatannya yang terbarukan, kualitas minyak yang lebih baik dan sehat, serta kurangnya kolesterol yang berhubungan dengan kesehatan tubuh. Tanaman kelor merupakan salah satu tanaman yang sedang gencar diperbincangkan secara meluas sebagai sumber minyak nabati yang memiliki banyak manfaat. Tanaman kelor diharapkan menjadi komoditi baru sebagai sumber minyak nabati.

Pemanfaatan biji kelor untuk berbagai keperluan, biasanya dilakukan dengan mengambil minyak yang terkandung dalam biji melalui proses pengepresan mekanik atau ekstraksi dengan bahan kimia. Menurut Widyastuti & Susilo (2013) 15.000–25.000 biji kelor mampu dihasilkan tanaman kelor setiap tahunnya. Biji kelor mengandung minyak sebesar 35–40% (Ruttarattanamongkol dkk., 2014). Proses pengambilan minyak dari biji kelor memiliki tujuan umum yaitu untuk memperoleh suatu minyak tidak rusak, mendapatkan minyak dengan hasil setinggi mungkin, ekonomis, efisien, dan untuk mendapatkan residu minyak berkualitas tinggi untuk mendapatkan nilai ekonomis yang tinggi (Avram dkk., 2014). Proses pengambilan minyak ini meliputi proses pengempaan, ekstraksi menggunakan pelarut, enzim, ekstraksi menggunakan karbon

Info Makalah:

Dikirim : 07-26-23;

Revisi 1 : 10-27-23;

Diterima : 11-27-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-812-2494-444

e-mail : sanggono@itb.ac.id

dioksida bertekanan tinggi, dan distilasi uap. Metode pengempaan dan ekstraksi menggunakan pelarut adalah metode yang paling efisien untuk memperoleh minyak dari biji saat ini. Kedua metode ini dapat terjadi baik dalam proses *batch* ataupun berkelanjutan. Bhutada dkk., (2016) melakukan ekstraksi dengan menggunakan pelarut campuran kloroform dan metanol dengan perbandingan 3:1 menghasilkan *yield* minyak biji kelor sebanyak 41%. Eman & Muhamad (2016) melakukan pengambilan minyak biji kelor dengan menggunakan metode mekanik dengan pengepresan dan dengan ekstraksi metode sokletasi menggunakan n-heksana sebagai pelarut. Proses ekstraksi dengan n-heksana sebagai pelarut, *yield* merata yang diperoleh adalah sebesar 41,5% dengan ukuran partikel biji kelor 500 μm . Sedangkan dengan menggunakan metode pengepresan secara mekanik memperoleh *yield* yang lebih rendah. Meskipun *yield* perolehan yang rendah, proses pengambilan minyak dari biji melalui proses pengempaan atau biasa disebut pengepresan dipilih apabila biji mengandung kadar minyak lebih dari 40%. Pengepresan merupakan metode tertua, paling sederhana untuk ekstraksi minyak dari biji-bijian, dan metode yang sering digunakan karena proses dan alat yang diperlukannya sederhana. Kelebihan lainnya adalah minyak hasil pengepresan juga tidak memerlukan proses tambahan lainnya. Tidak ada bahan kimia yang digunakan untuk memperoleh minyak dan karena hal itu residu atau ampas dari hasil pengepresan bebas dari bahan kimia (Fakayode, 2015). Biaya operasinya pun lebih rendah dibanding dengan ekstraksi menggunakan pelarut, hal ini juga metode pengepresan sering digunakan di negara-negara berkembang.

Komposisi asam lemak yang terkandung dalam minyak biji kelor mirip dengan kandungan asam lemak yang terkandung dalam minyak zaitun dengan asam lemak dominan adalah asam oleat sebesar lebih dari 70% (Aminah dkk., 2015; Dhofir dkk., 2017; Purwaniati dkk., 2019). Minyak biji kelor memiliki sifat yang lebih stabil karena mengandung antioksidan yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan minyak sawit, minyak kedelai, dan minyak kanola (Bhutada dkk., 2016). Kandungan asam lemak jenuh minyak biji kelor sebesar 21,2%, yaitu asam palmitat, asam stearat, arakidat dan behenat. Kandungan asam behenat yang tinggi adalah alasan mengapa minyak ini dikenal secara komersial sebagai minyak “Ben” atau “Behen”. Asam lemak tak jenuh minyak biji kelor terdiri dari asam lemak tunggal dan ganda yang memiliki persentase sebesar 82%, dengan 76,7% asam lemak tak jenuh tunggal terdiri dari asam gadoleat dan palmitoleat, dan 1,18% asam lemak tak jenuh ganda dengan kandungan 0,76% asam linoleat dan 0,46% asam linolenat (Leone dkk., 2016).

Minyak biji kelor termasuk dalam kategori minyak oleat tinggi, dan mengandung rasio asam lemak tak jenuh terhadap asam lemak jenuh yang tinggi. Rasio asam lemak tak jenuh terhadap asam lemak jenuh merupakan karakteristik dari beberapa minyak, terutama minyak zaitun, dan telah dikaitkan dengan pengurangan risiko semua penyebab kematian, kematian karena kardiovaskular, kejadian kardiovaskular, dan stroke. Karena itu, minyak biji kelor bisa menjadi pengganti minyak zaitun yang dapat diterima sebagai lemak makanan utama.

Antioksidan dan antibakteri yang terkandung dalam minyak biji kelor bermanfaat untuk menjaga kesehatan tubuh, menjadi pengawet alami, dan dapat memperpanjang masa simpan olahan, khususnya olahan berbahan baku daging-dagingan (Adam dkk., 2020; Aminah dkk., 2015). Biji kelor juga telah dipelajari secara ekstensif untuk kandungan metabolit sekunder yang menarik penggunaan biji kelor untuk tujuan medis. Beberapa penelitian telah menemukan aktivitas antioksidan yang baik dan telah mengisolasi senyawa fitokimia karena dari sifat biologisnya yang dapat digunakan sebagai molekul *nutraceutical* yakni senyawa bioaktif dalam makanan yang diperkaya, suplemen makanan, dan produk herbal. Total kandungan fenolik, senyawa antioksidan alami pada tumbuhan dari biji kelor berada di kisaran 4,58-4,95 mg/ 100 g biji kelor (Sing dkk., 2013; Singh dkk., 2009). Kandungan flavonoid terdiri dari katekin, epikatekin, kuersetin, dan kaempferol berturut-turut sebesar 749, 81,4, 1,87, 9,58 mg/100 g hadir dalam bentuk yang terikat (Sing dkk., 2013). Menariknya alkaloid, glukosinolat, dan isotiosianat yang merupakan komponen bioaktif terkandung juga dalam biji kelor.

Antioksidan sendiri merupakan suatu komponen yang melindungi sel-sel tubuh dari pengaruh oksidasi yang dapat menyebabkan sel-sel dan jaringan lain dalam tubuh rusak. Minyak biji kelor telah dipelajari sebagai antioksidan yang baik, yang mampu mengurangi kerusakan oksidatif dalam hal penuaan dan kanker. Senyawa-senyawa bioaktif minyak biji kelor juga berpotensi sebagai pendorong anti tumor (Leone dkk., 2016). Adapun kapasitas total antioksidan yaitu 1,82 mg/100 g, total fenolik 780 mg/100 g, dan total flavonoid 133 mg/100 g dalam ekstrak fenolik bebas (Sing dkk., 2013). Untuk itu pada penelitian ini, dilakukan pengepresan biji kelor dengan melakukan variasi kadar air biji kelor dan variasi temperatur pengepresan biji kelor untuk mengetahui pengaruh kadar air biji kelor dan temperatur pengepresan pada kandungan variasi asam lemak minyak biji kelor dan aktivitas kandungan antioksidan minyak biji kelor.

2. Metode

Prosedur kerja yang akan dilakukan meliputi persiapan bahan baku, proses ekstraksi dan pemurnian minyak biji kelor, dan proses karakterisasi minyak biji kelor sebagai produk.

2.1. Perlakuan Pendahuluan

Biji kelor bersih bebas cangkang hasil persiapan bahan baku memiliki kadar air awal 8,3%. Biji kelor bahan baku diberi pemanasan melalui proses pemasakan dengan memasukkan biji ke dalam oven menggunakan temperatur 105°C

selama 30 menit untuk mengatur kadar air dalam biji kelor agar kadar air sebesar 8%. Biji kelor bahan baku juga dilakukan pengukusan menggunakan temperatur 100°C selama 20 menit untuk menaikkan kadar air hingga kadar air 16%.

2.2. Proses Ekstraksi Biji Kelor

Ekstraksi dilakukan dengan menggunakan pres ulir. Biji kelor bersih dengan kadar air 8% dan 16% dimasukkan ke dalam wadah penampung di bagian atas alat pres ulir. Biji akan masuk barel dan dipanaskan dengan variasi temperatur 80, 100, dan 120°C melalui cincin pemanas. Kemudian tombol *on* ditekan dan ulir akan berputar dan mengepres biji kelor. Minyak yang dipres akan mengalir ke bagian bawah dan ditampung oleh wadah penampung. Sisa ampas biji akan keluar melalui aliran ampas.

2.3. Analisis Variasi dan Komposisi Asam Lemak Minyak Biji Kelor

Variasi dan komposisi asam lemak yang terkandung dalam minyak biji kelor dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-mass spectrometry* (GC-MS). Parameter yang digunakan dalam memperoleh variasi dan komposisi asam lemak mengikuti parameter yang dilakukan oleh Ibrahim dkk., (2018) yaitu suhu oven kolom 50°C, suhu injeksi 300°C, tekanan 13 kPa, laju alir 26,7 cm/s, total aliran 40,8 mL/menit, dan aliran kolom 0,54 mL/menit.

Minyak biji kelor hasil pengepresan diubah menjadi dalam bentuk *fatty acid methyl ester* atau FAME untuk menurunkan titik uap minyak yang tinggi dengan bantuan metanol dan katalis. Sampel minyak 0,5 gram dimasukkan ke dalam gelas kimia 50 mL. Menambahkan NaOH metanolik sebanyak 4 mL, kemudian tutup gelas kimia dengan aluminium foil lalu aduk menggunakan stirer dan panaskan pada temperatur 60°C selama 5 menit. Kemudian, tambahkan larutan BF₃ sebanyak 5 mL, kemudian dipanaskan pada temperatur 60°C selama 30 menit. Setelah 30 menit matikan pemanas, lalu tambahkan n-heksana p.a sebanyak 4 mL, kemudian aduk selama 5 menit. Setelah itu dinginkan larutan, kemudian tambahkan NaCl jenuh sebanyak 6 mL, ambil fasa atas (metil ester) masukan ke botol vial. Kemudian timbang 0,1 gram metil ester dan tambahkan n-heksana p.a sampai 2 gram. Kemudian minyak kelor dalam bentuk FAME yang telah ditambahkan n-heksana dimasukkan ke dalam kolom GC-MS dengan menggunakan parameter yang dilakukan oleh Ibrahim dkk. (2018). Pengukuran pada GC-MS memberikan data luas area dan *retention time* dari asam lemak yang terkandung dalam minyak kelor.

2.4. Analisis Aktivitas Antioksidan Minyak Biji Kelor

Analisis aktivitas antioksidan minyak biji kelor dilakukan dengan menggunakan metode *2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH). 10 mg minyak biji kelor dilarutkan dalam etanol 100 mL untuk membentuk larutan induk 100 ppm. Kemudian larutan induk 100 mL diencerkan menjadi larutan seri 20, 40, 60, dan 80 ppm. Larutan seri minyak biji kelor diambil 2 mL kemudian ditambahkan 2 mL larutan DPPH 40 ppm, kemudian diinkubasi selama 30 menit di ruangan tertutup. Penentuan aktivitas antioksidan minyak biji kelor dilakukan dengan mengukur serapan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 517 nm.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kandungan Asam Lemak

Analisis *Gas Chromatography-mass spectrometry* (GC-MS) dilakukan untuk menentukan komposisi asam lemak yang ada dalam minyak biji kelor. GC-MS berprinsip senyawa organik atau anorganik menghasilkan ion dengan melakukan metode yang tepat. Ion-ion dipisahkan dari senyawa berdasarkan *mass-to-charge* (*m/z*), kemudian mendeteksi secara kualitatif dan kuantitatif *m/z* dari masing-masing senyawa (Candraningrat dkk., 2021). Penggunaan GC-MS tidak hanya dapat mengetahui komponen-komponen dalam suatu senyawa, GC-MS juga dapat mengidentifikasi massa molekul relatif masing-masing komponen-komponen yang terkandung dalam senyawa tersebut (Josephus dkk., 2019).

Pada penelitian ini minyak biji kelor diderivatisasi ke dalam bentuk *fatty acid methyl ester* atau FAME sebelum diinjeksikan ke dalam GC-MS. Pembentukan FAME ini bertujuan untuk menurunkan titik uap minyak yang tinggi dengan bantuan metanol dan katalis. Hal ini dikarenakan metode GC-MS hanya dapat dilakukan untuk senyawa-senyawa yang mudah menguap, sehingga titik uap dari minyak yang tinggi harus diturunkan terlebih dahulu sebelum diinjeksikan ke dalam kromatografi gas (Candraningrat dkk., 2021).

Tabel 1 menunjukkan kandungan komposisi asam lemak dalam minyak biji kelor. Asam oleat merupakan asam lemak yang dominan dalam minyak biji kelor, diikuti oleh asam palmitat sebagai asam lemak terbesar kedua. Menurut Leone dkk. (2016), asam oleat yang terkandung pada minyak biji kelor lebih dari 70%. Kandungan asam oleat yang dalam minyak biji kelor pada penelitian ini sebesar 74,6-79,9%. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ayerza(h), (2019); Ogunsina dkk., (2014); Özcan (2020) juga memperoleh kandungan asam oleat yang dominan lebih dari 70% kandungan asam oleat dalam minyak biji kelor. Asam oleat yang tinggi dalam minyak biji kelor membuat minyak biji kelor baik untuk kesehatan. Asam oleat merupakan asam lemak tak jenuh yang termasuk dalam asam lemak omega 9 konfigurasi *cis*.

Asam palmitat dalam minyak biji kelor sebagai asam lemak dengan kandungan terbanyak ke dua. Pada penelitian ini diperoleh kandungan asam palmitat sebesar 5,77-7,78%. Kandungan asam palmitat dalam minyak biji kelor ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Özcan (2020), kandungan asam palmitat dalam minyak biji kelor berada pada rentang 5,73-17,1%. Asam palmitat menjadi komponen penting dari transportasi lipid, membran sel, dan sekresi, dan dalam tubuh.

Tabel 1. Komposisi Asam Lemak Minyak Biji Kelor.

Minyak Biji Kelor	Komposisi asam lemak (%)				
	Asam palmitat (C16:0)	Asam stearat (C18:0)	Asam oleat (C18:1)	Asam arakidat (C20:0)	Asam behenat (C22:0)
Kadar air biji 8% T = 80 °C	5,77	5,42	76,5	4,02	8,27
Kadar air biji 8% T = 100 °C	7,78	4,71	79,9	2,76	4,83
Kadar air biji 8% T = 120 °C	6,15	5,48	75,6	4,10	8,71
Kadar air biji 16% T = 80 °C	6,14	5,00	78,3	3,46	7,10
Kadar air biji 16% T = 100 °C	6,47	4,97	79,9	2,88	5,77
Kadar air biji 16% T = 120 °C	5,88	5,31	74,6	6,50	7,70
Ayerza(h), (2019)	5,73	5,40	72,4	3,14	5,56
Idris dkk. (2020)	9,20	8,46	50,7	6,41	10,5
Leone dkk. (2016)	6,25	4,97	73,6	3,23	6,02
Ogunsina dkk. (2014)	5,80	3,90	79,5	2,20	5,10
Özcan (2020)	5,73-17,1	0,8-7,6	67,9-85,0	0,6-5,0	2,52-7,24

Selanjutnya asam stearat yang terkandung dalam minyak biji kelor. Komposisi asam stearat diperoleh pada rentang 4,71-5,48%. Asam stearat dapat dimanfaatkan sebagai surfaktan. Asam stearat juga biasanya dimanfaatkan untuk kepentingan perawatan tubuh karena mampu melembapkan serta menghaluskan kulit.

Kandungan lain yang membuat minyak biji kelor menjadi spesial adalah asam behenat yang terkandung di dalamnya. Minyak biji kelor sendiri terkenal dengan *Behenic Oil* atau minyak behenat karena kandungan cukup mendominasi setelah asam oleat dan palmitat. Pada penelitian ini, kandungan asam behenat diperoleh sebesar 4,83–8,71%. Asam behenat sendiri memiliki banyak sekali manfaat. Asam behenat dimanfaatkan untuk keperluan perawatan tubuh sama seperti asam stearat. Pada keperluan perawatan tubuh, asam behenat sangat baik dimanfaatkan karena memiliki sifat yang menyejukkan dan dapat mengembalikan minyak alami kulit. Selain itu juga meningkatkan tingkat hidrasi secara keseluruhan. Asam behenat ini juga mudah larut di permukaan kulit, menjadikannya bahan yang diinginkan untuk dimasukkan ke dalam formula perawatan kulit. Selain untuk kulit, asam behenat dimanfaatkan untuk kondisioner pada rambut karena sifat yang melembutkan. Asam behenat tak hanya saja untuk keperluan kecantikan, industri otomotif juga memanfaatkan dalam minyak pelumas, dan sebagai penghambat penguapan pelarut dalam penghilang cat. Asam lemak lain dalam kandungan minyak biji kelor yang cukup tinggi juga adalah asam arakidat. Komposisi asam arakidat sebesar 2,76 – 6,50%. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan temperatur pada proses pengepresan minyak tidak mempengaruhi variasi dan komposisi dari asam lemak yang terkandung minyak biji kelor.

Ekstraksi mekanik biji kelor dengan menggunakan pres ulir pada penelitian menghasilkan minyak yang memiliki komposisi dan kandungan asam lemak yang hampir sama dengan ekstraksi menggunakan bantuan pelarut atau *solvent extraction*. Penelitian yang dilakukan Eman dan Muhamad, (2016) menghasilkan komposisi serta kandungan yang sama dengan penelitian ini yaitu 73,6% asam oleat, 6,04% asam palmitat, dan 6,73% asam behenat. Bhutada dkk., (2016) juga menunjukkan hasil yang sama pada ekstraksi biji kelor menggunakan metode ekstraksi pelarut. Kandungan asam lemak yaitu asam oleat 73,5%, asam stearate 7,7%, asam arakidat 4,6 %, dan asam behenat 4,9%. Hal ini menunjukkan metode dalam memperoleh minyak biji kelor tidak mempengaruhi komposisi dan kandungan asam lemak pada minyak.

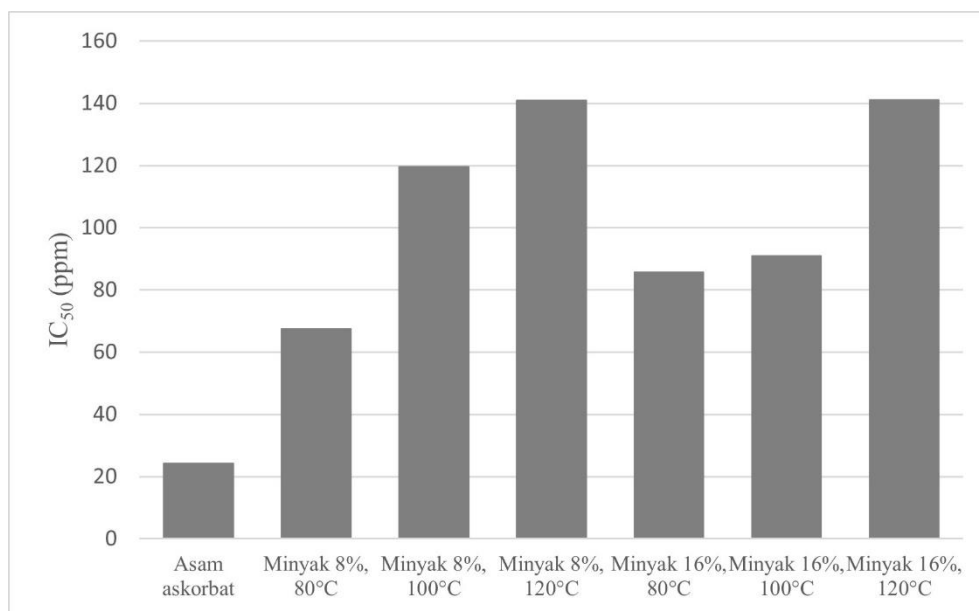
3.2. Aktivitas Antioksidan

Aktivitas antioksidan minyak biji kelor ditentukan dengan menggunakan metode *2,2-Diphenyl-1 picrylhydrazyl* (DPPH). DPPH adalah radikal bebas yang digunakan sebagai model dalam mengukur penangkapan radikal bebas. DPPH sebagai radikal bebas digunakan sebagai pereaksi dalam uji penangkapan radikal bebas. Hal ini karena DPPH memiliki sifat yang stabil dan penggunaan yang mudah yaitu cukup dilarutkan saja (Tristantini dkk., 2016). Penentuan aktivitas antioksidan dengan menggunakan metode DPPH itu sendiri, didasarkan pada reduksi dari larutan pelarut radikal bebas DPPH yang berwarna oleh penghambatan radikal bebas. Senyawa antioksidan memiliki atom hidrogen akan berikatan dengan elektron bebas dari senyawa radikal. Ikatan ini menyebabkan radikal bebas mengalami

perubahan menjadi senyawa non-radikal. Larutan DPPH yang berwarna ungu bertemu dengan bahan pendonor elektron menyebabkan DPPH akan tereduksi. Warna ungu pekat dari larutan DPPH akan memudar menjadi warna yang lebih terang hingga warna kuning pucat yang berasal dari gugus pikril (Sumiwi dkk., 2011; Tristantini dkk., 2016). Perubahan warna ini yang akan diukur absorbansinya untuk menentukan aktivitas antioksidan yang ada dalam minyak biji kelor dan asam askorbat menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

Gambar 1 menunjukkan aktivitas antioksidan dalam nilai IC_{50} dari minyak biji kelor pada penelitian ini dan asam askorbat sebagai standar perbandingan. Penggunaan asam askorbat sebagai perbandingan dikarenakan asam askorbat merupakan vitamin C yaitu antioksidan yang cukup umum sering digunakan. Berkurangnya penyerapan DPPH menunjukkan kapasitas senyawa untuk menangkap radikal bebas. Minyak biji kelor diketahui mendorong pengurangan DPPH. Aktivitas penangkal radikal bebas atau % inhibisi meningkat dengan konsentrasi minyak biji kelor dan asam askorbat yang juga meningkat. Aktivitas antioksidan dinyatakan sebagai nilai *inhibition concentration* atau IC_{50} atau nilai konsentrasi efektif. Nilai ini menunjukkan konsentrasi ekstrak dalam satuan ppm yang dapat menghambat 50% oksidasi. Suatu senyawa dengan nilai IC_{50} kurang dari 50 termasuk dalam kategori senyawa dengan antioksidan sangat kuat, kategori kuat jika nilai IC_{50} 50–100, kategori sedang jika nilai IC_{50} 101–150, dan kategori lemah jika nilai IC_{50} 151–200 (Abdullah dkk., 2014; Setiawan dkk., 2018; Tristantini dkk., 2016).

Gambar 1 menunjukkan nilai IC_{50} dari minyak biji kelor semakin meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pengepresan baik untuk kadar air biji kelor 8% maupun 1%. Hal ini dikarenakan terjadinya kerusakan antioksidan di dalam minyak biji kelor yang dipengaruhi oleh temperatur semakin meningkat akibat pemberian panas yang tinggi. Pada kadar air biji kelor 8% pada temperatur 80°C menghasilkan nilai IC_{50} yang paling rendah yaitu 67,4 ppm. Minyak biji kelor dengan temperatur pengepresan 80°C dengan kadar air biji kelor termasuk ke dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang kuat. Sedangkan untuk temperatur 100°C dan 120°C dengan kadar air biji kelor 8% termasuk ke dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang sedang.



Gambar 1. Aktivitas Antioksidan Minyak Biji Kelor, IC_{50} .

Nilai IC_{50} pada kadar air biji kelor 16% menunjukkan hasil yang sama. Pada temperatur 80°C dan 100°C, nilai IC_{50} berturut-turut sebesar 85,5 dan 90,9 ppm masuk ke dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang kuat. Sedangkan saat dinaikkan temperatur menjadi 120°C, nilai IC_{50} meningkat juga menjadi 141,1 ppm sehingga termasuk dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang sedang. Apabila dibandingkan dengan asam askorbat sebagai standar perbandingan. Aktivitas antioksidan minyak biji kelor pada penelitian ini dikategorikan sebagai senyawa dengan aktivitas antioksidan yang sedang hingga kuat. Pada temperatur 80°C pada kadar air 8% dan 16% termasuk dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang mendekati dengan asam askorbat. Sehingga minyak biji kelor baik dimanfaatkan karena aktivitas antioksidannya yang masuk dalam kategori sedang hingga kuat.

Aktivitas antioksidan minyak biji kelor kemungkinan dihasilkan dari adanya α -tokoferol atau vitamin E dan berbagai jenis asam lemak tak jenuh dalam minyak. Aktivitas antioksidan dapat mencegah oksidasi lipid dan melindungi minyak biji kelor dari ketengikan. Tokoferol merupakan vitamin yang larut dalam lemak. α -tokoferol dikaitkan dengan pencegahan penyakit jantung dan kardiovaskular. Selain itu juga α -tokoferol dalam minyak biji kelor dapat mencegah oksidasi lipid dalam tubuh, seperti asam lemak tak jenuh ganda dan komponen seluler lainnya. Dengan demikian, aktivitas antioksidan minyak biji kelor yang sedang hingga kuat, minyak biji kelor dapat menjadi sumber alami vitamin yang larut dalam lemak dan sumber potensial untuk kepentingan industri (Wiltshire dkk., 2022).

Kesimpulan

Kandungan asam lemak minyak biji kelor meliputi asam oleat 74,6-79,9%, asam palmitat sebesar 5,77-7,78%, asam stearat 4,71-5,48%, asam behenat 4,83-8,71%, dan asam arakidat sebesar 2,76-6,50%. Aktivitas antioksidan tertinggi diperoleh pada kondisi temperatur pengepresan 80°C dengan kandungan kadar air biji kelor 8%, menghasilkan nilai IC₅₀ sebesar 67,4 ppm termasuk dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan kuat. Asam lemak yang cukup beragam yang dikandung minyak biji kelor serta aktivitas antioksidan yang termasuk ke dalam senyawa dengan aktivitas antioksidan yang sedang hingga kuat, membuat minyak biji kelor memiliki potensi menjadi sumber minyak nabati yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan.

Daftar Pustaka

- Abdullah, W., Runtuwene, M. R. J., & Kamu, V. S. (2014). Phytochemical Test And Determination Inhibition Concentration 50% On Some Medicinal Plants In The Tidore Island. *Jurnal Ilmiah Sains*, 14(2), 95. <https://doi.org/10.35799/jis.14.2.2014.6063>
- Adam, A., Hartono, R., Salim, A., Irwan, Z., & Imran, A. (2020). Water and Microbial Contents in Moringa Oleifera Seed Flour as Food Supplement to Prevent Stunting. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11(10), 694-697.
- Aminah, S., Ramdhan, T., & Yanis, M. (2015). Kandungan Nutrisi dan Sifat Fungsional Tanaman Kelor (Moringa oleifera). *Buletin Pertanian Perkotaan*, 5, 35-44.
- Avram, M., Stoica, A., Dobre, T., & Stroescu, M. (2014). Extraction of Vegetable Oils from Ground Seeds by Percolation Techniques. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 76(2), 13-22.
- Ayerzah, R. (2019). Seed characteristics, oil content and fatty acid composition of moringa (Moringa oleifera Lam.) seeds from three arid land locations in Ecuador. *Industrial Crops and Products*, 140(July), 111575. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111575>
- Bhutada, P. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Nemade, P. R., & Jain, R. D. (2016). Solvent assisted extraction of oil from Moringa oleifera Lam. seeds. *Industrial Crops and Products*, 82, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.004>
- Candraningrat, I. D. A. A. ., Santika, A. A. G. J., Dharmayanti, I. A. M. S., & Prayascita, P. W. (2021). Review Kemampuan Metode Gc-Ms Dalam Identifikasi Flunitrazepam Terkait Dengan Aspek Forensik Dan Klinik. *Jurnal Kimia*, 15(1), 12. <https://doi.org/10.24843/jchem.2021.v15.i01.p03>
- Dhofir, M., Dona, N. R., Wibawa, U., & Hasanah, N. (2017). Minyak Kelapa Beraditif Minyak Zaitun sebagai Isolasi Peralatan Tegangan Tinggi. *Eccis*, 11(2), 69-76.
- Eman, N. A., & Muhamad, K. N. S. (2016). Comparison of Moringa Oleifera seeds oil characterization produced chemically and mechanically. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 36(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012063>
- Fakayode, O. A. (2015). *Process Optimisation of Mechanical Oil Expression from Moringa oleifera (Lam.) (Moringa Seeds)*. University of Ibadan.
- Ibrahim, Y., Salimi, Y. K., & Ischak, N. I. (2018). Karakterisasi Asam Lemak Hasil Hidrolisis pada Minyak Biji Kelor (Moringa oleifera) dengan Metode Kromatografi Gas-Spektroskopi Massa. *Jurnal Entropi*, 13, 81-88. <https://doi.org/10.34312/jambchem.v1i1.2101>
- Idris, A. A., Nour, A. H., Omer Ishag, O. A., Ali, M. M., Erwa, I. Y., & Nour, A. H. (2020). Physicochemical properties and fatty acids composition of sudanese moringa oleifera seed oil. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, 7(3), 911-920. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.771260>
- Josephus, L. M. ., Pontoh, J., & Momuat, L. I. (2019). Kandungan Lemak dan Komposisi Asam-Asam Lemak Pada Bagian Badan Ikan Julung-Julung (Hemiramphus brasiliensis). *Chem. Prog.*, 12(2), 73-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.35799/cp.12.2.2019.27309>
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2016). Moringa oleifera seeds and oil: Characteristics and uses for human health. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/ijms17122141>
- Ogunsina, B. S., Indira, T. N., Bhatnagar, A. S., Radha, C., Debnath, S., & Gopala Krishna, A. G. (2014). Quality characteristics and stability of Moringa oleifera seed oil of Indian origin. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 503-510. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0519-5>
- Özcan, M. M. (2020). Moringa spp: Composition and bioactive properties. *South African Journal of Botany*, 129, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.11.017>
- Purwaniati, P.-, Umri, Z. F., & Rachmawati, W. (2019). Identifikasi Minyak Kedelai yang Ditambahkan dalam Produk Minyak Zaitun dengan Metode Kromatografi Gas-Spektroskopi Massa. *ad-Dawaa' Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(2), 55-62. <https://doi.org/10.24252/djps.v2i2.11486>
- Ruttarattanamongkol, K., Siebenhandl-Ehn, S., Schreiner, M., & Petrasch, A. M. (2014). Pilot-scale supercritical carbon dioxide extraction, physico-chemical properties and profile characterization of Moringa oleifera seed oil in comparison with conventional extraction methods. *Industrial Crops and Products*, 58, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.020>

- Setiawan, F., Yunita, O., & Kurniawan, A. (2018). Uji aktivitas antioksidan ekstrak etanol kayu secang dan FRAP. *Media Pharmaceutica Indonesiana*, 2(2), 82–89.
- Sing, R. . G., Negi, P., & Radha, C. (2013). Phenolic composition, antioxidant and antimicrobial activities of free and bound phenolic extracts of *Moringa oleifera* seed flour. *Journal of Functional Foods*, 5(4), 1883–1891. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.09.009>
- Singh, B. N., Singh, B. R., Singh, R. L., Prakash, D., Dhakarey, R., Upadhyay, G., & Singh, H. B. (2009). Oxidative DNA damage protective activity, antioxidant and anti-quorum sensing potentials of *Moringa oleifera*. *Food and Chemical Toxicology*, 47(6), 1109–1116. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.01.034>
- Sumiwi, S. A., Subarnas, A., Supriyatna, S., & Bratadiredja, M. A. (2011). Antioxidant activity of Sintoc (*Cinnamomum sintoc* Bl.) essential oil and the ethanol extract of its bark using 1,1-difenil-2-pikrilhidrazil (DPPH). *Indonesian Journal of Applied Sciences*, 1(1), 1–7.
- Tristantini, D., Ismawati, A., Pradana, B. T., & Gabriel, J. (2016). Pengujian Aktivitas Antioksidan Menggunakan Metode DPPH pada Daun Tanjung (*Mimusops elengi* L). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan,"* 2.
- Wen, C., Shen, M., Liu, G., Liu, X., Liang, L., Li, Y., Zhang, J., & Xu, X. (2022). Edible vegetable oils from oil crops: Preparation, refining, authenticity identification and application. *Process Biochemistry*, 124, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.11.017>
- Widyanastuti, N. A., & Susilo, B. (2013). Study of Heat Variation on Kelor Seed (*Moringa oleifera*) Oil Processing Using Hydraulic Press Extraction. In *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis* (Vol. 1, Nomor 2).
- Wiltshire, F. M. S., de França Santos, A., Silva, L. K. B., Carvalho de Almeida, L., dos Santos Freitas, L., Lima, A. S., Fricks, A. T., Dariva, C., & Soares, C. M. F. (2022). Influence of seasonality on the physicochemical properties of *Moringa oleifera* Lam. Seed oil and their oleochemical potential. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 4(August 2021), 0–5. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100068>

Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembapan pada Mesin Tetas Telur Penyu Berbasis IoT Di Penangkaran Penyu Batu Hiu Pangandaran

Nivika Tiffany Somantri¹, Yuda Bakti Zainal¹, Wibisana Nugraha¹,
M. Reza Hidayat¹, Dede Furqon Nurjaman¹, dan Naftalin Winanti¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia
nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id, zainalyuda20@gmail.com, wibisananugraha@unjani.ac.id,
mreza@lecture.unjani.ac.id, dede.furqon@lecture.unjani.ac.id, naftalin.winanti@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Chelonioidea atau Penyu termasuk hewan yang saat ini berada di ambang kepunahan. Sebagai upaya pelestarian penyu, KPBL Batu Hiu membuat sebuah penetasan telur penyu semi alami, namun suhu dan kelembapannya masih tergantung dengan cuaca sekitar. Untuk menangani masalah tersebut, sebuah mesin tetas telur penyu bernama “*Smart turtle hatchery egg machine*” (“*Smart THEM*”) dibuat untuk dapat menjaga suhu dan kelembapan media pasir. Prototipe “*Smart THEM*” dirancang untuk dapat menjaga suhu media pasir pada mode jantan (27–29°C) dan mode betina (29–32°C) menggunakan sensor suhu DS18B20, dan menjaga kelembapan media pasir (37,5%–50,2%) menggunakan *capacitive soil moisture sensor*. Telur penyu yang diinkubasi pada suhu tinggi akan melahirkan penyu betina, dan pada suhu rendah, melahirkan penyu jantan. Prototipe tersebut dilengkapi indikator sisa air dalam tangki menggunakan sensor ultrasonik. Alat ini juga memanfaatkan jaringan internet sehingga dapat dilakukan pemantauan jarak jauh melalui aplikasi *Blynk*. Sistem ini dikontrol menggunakan mikrokontroler Mega+Wi-Fi. Dalam pengujiannya “*Smart THEM*” mampu menjaga suhu pada mode jantan yaitu 27,87–28,19°C, dan mode betina yaitu 30,19–30,31°C. Selain itu “*Smart THEM*” juga mampu menjaga kelembapan antara 45%–48%. Respon waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu sebesar 0,5°C adalah 20 menit, dan untuk menaikkan kelembapan sebesar 20% adalah 3 detik.

Kata kunci: penyu, suhu, kelembapan, *capacitive soil moisture sensor*, sensor ultrasonik

Abstract

Chelonioidea or Sea turtle is an animal that is currently on the verge of extinction. *Smart THEM* prototype is designed to be able to maintain temperature of the sand medium in male mode (27–29°C) and female (29–32°C) using DS18B20 temperature sensor, and maintain the humidity of the sand medium (37.5%–50.2 %) using a capacitive soil moisture sensor with an indicator of the remaining water in the tank using an ultrasonic sensor. Turtle eggs incubated at high temperatures will give birth to female turtles, and at low temperatures, male turtles. This tool also utilizes internet networks for remote monitoring through the *Blynk* application by using a Mega+Wi-Fi microcontroller. In the test, *Smart THEM* is able to maintain the temperature in the male mode, which is 27.87–28.19 °C, and in the female mode, which is 30.19–30.31°C. *Smart THEM* is also able to maintain humidity between 45%–48%. The response time needed to increase temperature by 0.5°C is 20 minutes, and the humidity by 20% is 3 seconds. *Blynk* application is able to acquire temperature and humidity, and remaining water data in the tank from *Smart THEM* via internet.

Keywords: sea turtle, temperature, humidity, *capacitive soil moisture sensor*, ultrasonic sensor

1. Pendahuluan

Pada saat ini, Chelonioidea mengalami penurunan populasi yang mengakibatkan keberadaan penyu semakin langka (Wirajaya dkk., 2020). Ancaman penurunan populasi penyu di dunia disebabkan oleh berbagai faktor baik berasal dari kegiatan manusia maupun dari alam (Durani dkk., 2018). Salah satu faktor kegiatan manusia adalah para oknum nelayan yang mengambil telur penyu untuk dijual atau dikonsumsi, sedangkan salah satu faktor alam disebabkan oleh predator, banyak telur penyu gagal menetas karena dimangsa oleh hewan lain seperti burung dan biawak, sehingga keberadaan penyu menetas telur di habitat aslinya sudah tidak aman lagi (Ariani, Vandika, dkk., 2019).

Di Jawa Barat tepatnya di pantai Batu Hiu Pangandaran ada sebuah penangkaran penyu yang dikelola oleh Kelompok Penangkaran Biota Laut (KPBL) sebagai konservasi terhadap penyu dengan cara membuat tempat penetasan telur penyu secara semi alami untuk melindungi telur penyu dari ancaman predator dan kegiatan manusia (Ariani, Marpitalia, dkk., 2019). Namun dengan perubahan cuaca yang tidak menentu saat ini membuat tingkat keberhasilan tetas pada proses penetasan telur penyu secara semi alami mengalami penurunan dikarenakan suhu dan kelembapan yang diperlukan media pasir saat penetasan telur penyu

Info Makalah:

Dikirim : 07-27-22;

Revisi 1 : 11-17-22;

Diterima : 12-01-22.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 896-8610-7919

e-mail : nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id

masih tergantung dengan cuaca sekitar (Rindra dkk., 2022). Ada dua faktor utama yang mempengaruhi hasil penetasan telur penyus yaitu suhu dan kelembapan pasir.

Dalam membantu konservasi penyus di Batu Hiu Pangandaran, maka dilakukan penelitian rancang bangun suatu alat penetasan telur penyus yang dapat mengatur suhu dan kelembapan secara otomatis sehingga penetasan telur penyus tidak lagi bergantung terhadap cuaca (Endra dkk., 2019). Selain itu alat penetasan telur penyus ini dapat mengatur jenis kelamin penyus yang ingin dihasilkan dengan mengatur suhu media pasir (Aluh & Lidyawati, 2018). Telur penyus yang diinkubasi pada suhu tinggi akan melahirkan penyus betina, dan pada suhu rendah, melahirkan penyus jantan (Nurazizah dkk., 2017). Alat ini diberi nama "*Smart Turtle Hatchery Egg Machine*" atau disingkat "*Smart-THEM*".

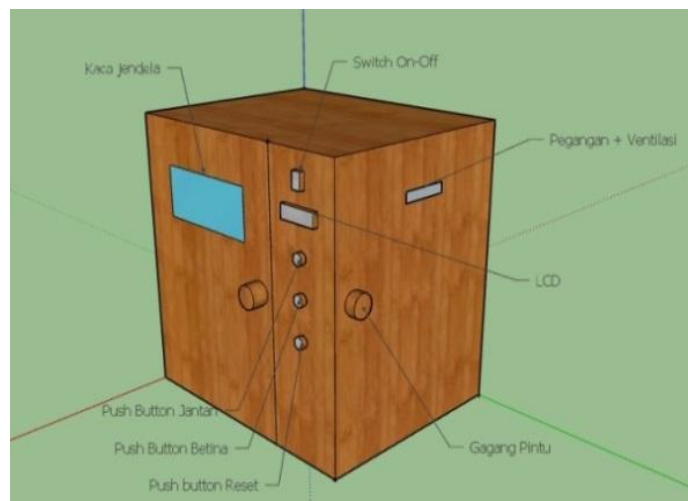
Pada penelitian yang dilakukan oleh (Safitri, 2019) mesin tetas telur penyus yang dinamakan "*Smart Turtle Egg Incubator*" (STUR-EGI) mampu menjaga suhu dan kelembapan secara otomatis (Wahyuningsih dkk., 2019). Adapun kekurangan pada alat ini yaitu untuk mengetahui suhu dan kelembapan harus melihat secara langsung pada layar *Liquid Crystal Display* (LCD), sehingga untuk mengambil data suhu dan kelembapan pemilik alat tersebut harus berada pada lokasi yang sama dengan alat tersebut (Saleh & Haryanti, 2017). Sebagai solusi alternatif ditambahkan sistem pemantauan suhu dan kelembapan berbasis *Internet of things* sehingga untuk mengambil data suhu dan kelembapan pada prototipe "*Smart-THEM*" dapat dilakukan dengan jarak yang jauh. Metode pengambilan data suhu dan kelembapan yaitu menggunakan aplikasi *Blynk* yang diinstal melalui *smartphone* Android. Selain data suhu dan kelembapan, ditambahkan juga sistem pemantauan sisa air dalam tangki.

2. Metode

Metode penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu perancangan, realisasi prototipe, dan pengujian prototipe.

2.1. Desain Prototipe SMART THEM

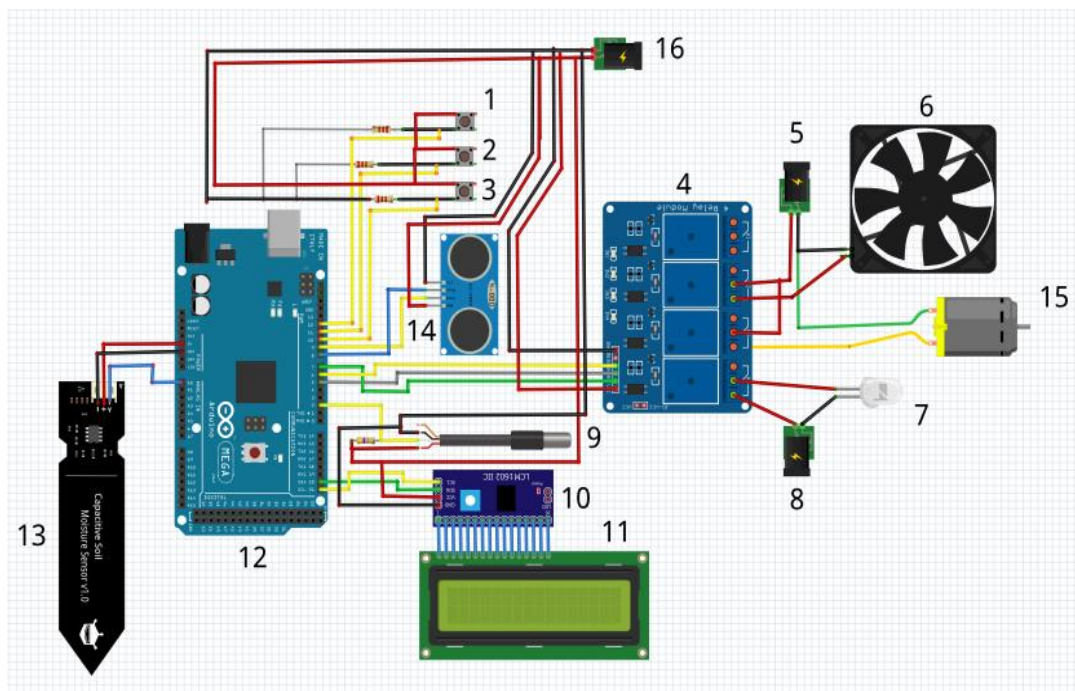
Desain prototipe "*Smart THEM*" dibuat dengan bahan triplek ketebalan 8 mm dengan ukuran keseluruhan panjang 50 cm, lebar 40 cm, tinggi 50 cm, terdapat juga kotak untuk menyimpan media pasir dengan ukuran panjang 30 cm, lebar 30 cm, tinggi 30 cm. Kapasitas kotak pasir diperkirakan dapat menyimpan 25 sampai 64 butir telur penyus tergantung dengan jenisnya. Ukuran telur bervariasi antar spesies penyus, dengan ukuran telur terkecil milik penyus sisik (*Eretmochelys imbricata*) dengan diameter 3,8 cm dan telur terbesar milik penyus belimbing (*Dermochelys coriacea*) diameter 5,3 cm (Risno dkk., 2022). Gambar 1 adalah tampilan bagian depan dan samping kanan "*Smart THEM*", pada bagian ini terdapat saklar, LCD, *Push Button* jantan, *Push Button* betina, *Push Button* reset, Gagang pintu, kaca jendela, dan pegangan + ventilasi. Gambar 2 adalah tampilan bagian penyimpanan tangki air dan papan sirkuit, pada bagian ini disimpan tangki air dan juga komponen-komponen yang digunakan dalam prototipe "*Smart THEM*".



Gambar 1. Tampak Depan dan Samping Kanan.



Gambar 2. Tampak Bagian Penyimpanan Tangki Air dan Komponen.



Gambar 3. Diagram Skematik.

Gambar 3 merupakan diagram skematik dalam penelitian menggunakan pin-pin yang telah disesuaikan dengan program mikrokontroler. Diagram skematik pada penelitian ini dibuat menggunakan aplikasi fritzing yang sudah ter-install library komponen yang dibutuhkan. Penjelasan dari diagram skematik ditunjukkan pada tabel 1.

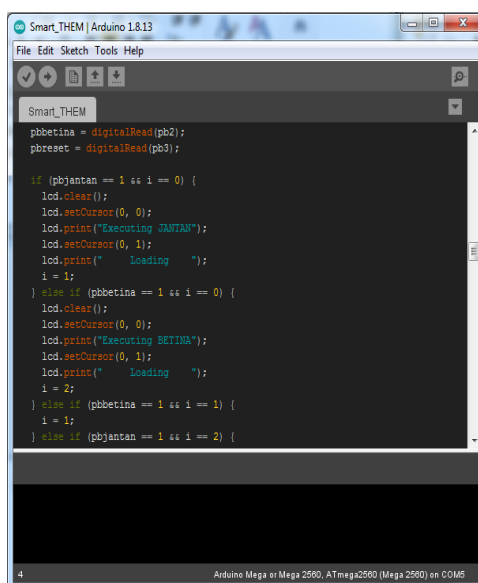
2.2. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak (*software*) adalah sekumpulan data instruksi yang ditanamkan pada komputer. *Software* dibutuhkan sebagai penghubung semua komponen perangkat keras (*hardware*) dengan penggunanya. Berdasarkan jenisnya *software* dibagi menjadi 3 jenis, yaitu sistem operasi, bahasa pemrograman, dan program aplikasi (Efendi, 2018). Pada penelitian ini, digunakan 2 jenis *software* yaitu bahasa pemrograman Arduino IDE untuk ditanamkan pada Mega + Wi-Fi dan program aplikasi *Blynk* untuk pemantauan suhu, kelembapan, dan sisa air dalam tangki berbasis *Internet of things*. Perancangan program mikrokontroler Mega + Wi-Fi menggunakan aplikasi Arduino IDE, dilakukan dengan dua (2) tahapan sebagai berikut :

- Mode pertama, CH340G terkoneksi ke ESP8266 digunakan untuk mengunggah *firmware* ESP8266, *software* yang digunakan untuk mengunggah *firmware* adalah “*esp8266 flasher*”, *file* yang digunakan untuk mengisi *firmware* ESP8266 berekstensi .bin, tampilan *esp8266 flasher*.
- Mode kedua, CH340G terkoneksi ke ATmega2560 COM3 terkoneksi ke ESP8266 digunakan untuk mengunggah *sketch* program dari aplikasi Arduino IDE ke mikrokontroler. Gambar 4 adalah proses perancangan program mikrokontroler.

Tabel 1. Daftar Komponen dan Penentuan Pin Mikrokontroler Mega + Wifi.

No	Nama	Pin			
		Komponen	Mega + Wifi	Relay	Power
1	Push Button Reset	Vcc	-	-	5V
		Gnd	12	-	Gnd
2	Push Button Betina	Vcc	-	-	5V
		Gnd	11	-	Gnd
3	Push Button Jantan	Vcc	-	-	5V
		Gnd	10	-	Gnd
4	4 channel Relay	Vcc	-	-	5V
		Gnd	Gnd	-	Gnd
		IN2	6	-	-
		IN3	5	-	-
5	12 VDC 10A PSU	Vcc	-	-	220VAC
		Gnd	-	-	-
6	Kipas 12VDC	Vcc	-	NO IN2	12VDC+
		Gnd	-	-	12VDC-
7	Lampu pijar	Fasa	-	NO IN4	220 VAC
		Netral	-	-	Netral
8	220 VAC 50Hz	Vcc	-	-	-
		Gnd	-	-	-
9	Sensor suhu DS18B20	Vcc	5V	-	-
		Gnd	Gnd	-	-
		Data	2	-	-
10	I2C LCD	Vcc	-	-	5V
		Gnd	Gnd	-	-
		SDA	SDA20	-	-
		SCL	SCL21	-	-
11	LCD 16 x 2	-	-	-	-
12	Mega + Wi-Fi	-	-	-	5 VDC
13	Capacitive Soil Moisture Sensor	Vcc	5V	-	-
		Gnd	Gnd	-	-
		Data	A0	-	-
14	Sensor Ultrasonik HCSR04	Vcc	5V	-	-
		Gnd	Gnd	-	-
		Trig	8	-	-
		Echo	9	-	-
15	Pompa 12VDC	Vcc	-	NO IN3	12VDC+
		Gnd	-	-	12VDC-
16	DC-DC Step down	V+	-	-	12VDC+
		V-	-	-	12VDC-



Gambar 4. Perancangan Program Mikrokontroler Menggunakan Aplikasi Arduino IDE.

Tahap berikutnya adalah perancangan aplikasi *Blynk* dilakukan dengan tiga (3) tahapan yaitu (Umam, 2018):

- Aplikasi *Blynk* diunduh melalui *PlayStore*.
- Akun *Blynk* didaftarkan menggunakan email untuk mendapatkan kode autentikasi token, kemudian *copy-paste* kode autentikasi token yang dikirim oleh *Blynk* melalui *email* ke dalam program *Arduino IDE*. *Sketch* program yang telah terisi program *Blynk* di-upload ke *Mega + Wi-Fi*.
- Beberapa jenis *widget* digunakan yaitu *gauge* untuk sistem *monitoring* suhu, kelembapan, dan sisa air dalam tangki, kemudian *LED* untuk status jantan atau betina, kemudian *SuperChart* untuk pencatatan nilai suhu, kelembapan dan sisa air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan *Widget* yang Digunakan pada Aplikasi *Blynk*.

2.3. Realisasi Prototipe *SMART THEM*

Realisasi adalah sebuah proses perakitan semua komponen baik *hardware* maupun *software* menjadi sebuah prototipe. Gambar 6 adalah tampak depan dari prototipe "*Smart THEM*" pada bagian ini terdapat *LCD*, *on-off switch*, *push button*, dan kaca jendela.



Gambar 6. Tampak Depan Prototipe "*Smart THEM*".



Gambar 7. Tampak dalam Bagian Komponen dan Tangki Air.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Software

Pengujian *software* yang dilakukan meliputi pengujian *monitoring* LCD, dan pengujian sistem *monitoring Blynk*. Pengujian EEPROM dilakukan untuk mengetahui keberhasilan algoritma EEPROM dalam menyimpan data opsi jenis kelamin. Pengujian pada *monitoring* LCD dilakukan untuk mengetahui apakah algoritma program *monitoring* LCD dapat menampilkan data suhu, kelembapan, dan sisa air dalam tangki yang telah dibaca sensor. Pengujian pada sistem *monitoring Blynk* dilakukan untuk mengetahui kesesuaian *monitoring* suhu, kelembapan dan sisa air dalam tangki pada aplikasi *Blynk* dengan LCD.

Pada Prototipe “*Smart THEM*”, terdapat LCD 16×2 yang digunakan untuk menampilkan data suhu, kelembapan, sisa air dalam tangki, dan indikator jantan atau betina. Untuk dapat menampilkan data-data tersebut pada LCD maka diperlukan algoritma program *monitoring* LCD yang ditanam pada mikrokontroler. LCD 16×2 dapat menampilkan karakter sebanyak 32 buah, dan masing-masing karakter memiliki resolusi 40 piksel yang terdiri dari 5 kolom dan 8 baris. Metode pengujian yang dilakukan adalah membandingkan *monitoring* pada LCD dengan yang terbaca pada *serial monitor*.

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa data suhu, kelembapan, sisa air dalam tangki, dan jenis kelamin dapat ditampilkan pada layar LCD. Maka kesimpulannya, algoritma program *monitoring* LCD telah bekerja sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 8. Tampilan *Monitoring* LCD.

Sistem *monitoring Blynk* berbasis *Internet of Things* digunakan agar data suhu, kelembapan, dan sisa air dalam tangki pada prototipe “*Smart THEM*” dapat diakuisisi secara jarak jauh. Untuk mengetahui keberhasilan sistem *monitoring Blynk* berbasis *internet of things*, maka pengujian kesesuaian *monitoring Blynk* dengan kondisi pada prototipe perlu dilakukan. Metode yang digunakan pada pengujian keberhasilan sistem *monitoring Blynk* yaitu membandingkan nilai suhu, kelembapan dan sisa air dalam tangki pada LCD yang terdapat pada prototipe, dengan aplikasi *Blynk* seperti Gambar 9. Data keberhasilan *monitoring* konektivitas *Blynk* ditulis pada Tabel 2. Data

kesesuaian *monitoring Blynk* dengan LCD pada prototipe diambil selama 10 menit dengan interval 1 kali, kemudian hasilnya ditulis pada Tabel 3.



Gambar 9. Proses Pengujian Kesesuaian *Monitoring Blynk* dengan LCD pada Prototipe.

Tabel 3. Data kesesuaian *monitoring Blynk* dengan LCD.

Menit	Pemantauan LCD			Pemantauan <i>Blynk</i>		
	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Sisa air (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Sisa air (%)
1	26,75	47	50	26,75	47	50
2	26,75	47	50	26,75	47	50
3	26,75	47	50	26,75	47	50
4	26,69	47	50	26,69	47	50
5	26,75	47	50	26,75	47	50
6	26,75	47	50	26,75	47	50
7	26,75	47	50	26,75	47	50
8	26,69	47	50	26,69	47	50
9	26,75	47	50	26,75	47	50
10	26,75	47	50	26,75	47	50

Kemudian hasil pengujian kesesuaian *monitoring Blynk* dapat dilihat pada Tabel 3, dari hasil tersebut selama 10 kali pengambilan data, hasil *monitoring* rata-rata nilai suhu yang diperoleh dengan pemantauan LCD ataupun *Blynk* adalah 26,738 °C, kelembapan, dan sisa air pada aplikasi *Blynk* sesuai dengan yang terdapat pada LCD, maka dapat disimpulkan bahwa *monitoring Blynk* telah bekerja dengan baik.

3.2. Pengujian Suhu dan Kelembapan

Pengujian ini dilakukan sebagai perbandingan suhu dan kelembapan antara “*Smart THEM*” dan penetasan telur penyu semi alami yang ada di KPBL Batu Hiu. Gambar 10 adalah alat yang digunakan untuk mengambil data suhu dan kelembapan pada penetasan penyu semi alami, alat ini menggunakan sensor yang sama dengan yang digunakan pada “*Smart THEM*”, yaitu sensor suhu DS18B20 dan *capacitive soil moisture sensor*, sensor ini kemudian dirangkai ke mikrokontroler arduino uno. Untuk membaca data suhu dan kelembapannya digunakan *serial monitor* yang terdapat pada aplikasi ArduinoDroid yang telah di-*install* di *smartphone*.

Data suhu dan kelembapan diambil dalam 3 waktu yaitu pukul 06.00 WIB (pagi), pukul 13.00 WIB (siang), dan pukul 22.00 WIB (malam) seperti yang ditunjukkan Gambar 11 hal ini dilakukan karena berdasarkan observasi di lapangan, pada waktu ini suhu sekitar KPBL Batu Hiu mengalami perubahan yang tinggi. Suhu paling tinggi terjadi pada pukul 13.00 WIB, sedangkan suhu paling rendah terjadi pukul 06.00 WIB, dan suhu pertengahan pada pukul 22.00 WIB. Suhu paling tinggi pukul 13.00 WIB dikarenakan pada pukul tersebut matahari tepat berada di atas, dan sedang sangat terik, pada pukul 06.00 matahari masih berada di bagian paling timur, dan baru terbit.

Tabel 5. Data Perbandingan Suhu Penyus Betina (°C).

Waktu (WIB)	Suhu penetasan telur penyus semi alami	Suhu "Smart THEM"
06.00	28,81	30,31
13.00	32,50	30,25
22.00	28,94	30,19

Tabel 6. Data Perbandingan Kelembapan (%).

Waktu (WIB)	Kelembapan penetasan telur penyus semi alami	Kelembapan "Smart THEM"
06.00	31	48
13.00	34	47
22.00	34	45

Gambar 12 adalah pengambilan data suhu dan kelembapan media pasir pada "Smart THEM", diambil menggunakan aplikasi *Blynk* dalam waktu yang bersamaan ketika mengambil data suhu dan kelembapan media pasir di penetasan penyus semi alami. Data yang telah diambil kemudian dimasukkan ke dalam tabel untuk dibandingkan. Tabel 4, 5 dan 6 adalah data perbandingan suhu dan kelembapan. Pada mode jantan, suhu media pasir "Smart THEM" terjaga antara 27,87–28,19°C, sedangkan suhu media pasir pada penetasan semi alami fluktuatif dari 28,75 sampai 31,25°C, kemudian pada mode betina, suhu media pasir "Smart THEM" terjaga antara 30,19 – 30,31°C, sedangkan suhu media pasir pada penetasan penyus semi alami fluktuatif antara 28,81 sampai 32,50. Untuk kelembapan media pasir pada "Smart THEM" terjaga antara 45%–48% dimana masih termasuk kedalam *range* kelembapan yang diinginkan yaitu 37,5% sampai 50,1%, sedangkan kelembapan media pasir pada penetasan penyus semi alami di bawah *range* ideal yaitu antara 31% - 34%. Dapat disimpulkan bahwa dengan adanya "Smart THEM", suhu dan kelembapan media pasir dapat terjaga di rentang yang diinginkan baik untuk jantan maupun betina dan tidak lagi bergantung pada cuaca sekitar.

Kesimpulan

Hasil pengujian suhu pada mode jantan terjaga pada *range* 27,87–28,19°C, masih dalam *range* yang diinginkan yaitu 27–29°C, dan hasil pengujian suhu pada mode betina terjaga pada *range* 30,19–30,31, masih dalam *range* yang diinginkan yaitu 29–32°C, kemudian untuk kelembapan pasir berhasil dijaga pada *range* 45%-48%, masih dalam *range* kelembapan yang diinginkan yaitu 37,5%–50,1%. Respon waktu yang dibutuhkan sistem untuk menaikkan suhu pasir sebesar 0,5°C adukan ialah sekitar 20 menit, dan untuk menaikkan kelembapan pasir sebesar 20% adalah sekitar 3 detik. Perancangan dan realisasi sistem *monitoring* pada "Smart THEM" berbasis *internet of things* menggunakan aplikasi *Blynk* telah bekerja dengan baik. Aplikasi *Blynk* telah mampu mengakuisisi data suhu, kelembapan dan sisa air dalam tangki dari prototipe "Smart THEM" melalui jaringan internet. Berdasarkan keseluruhan perancangan alat masih terdapat kekurangan, untuk itu penulis menyarankan pengembangan selanjutnya untuk menyempurnakan alat ini. Berikut saran penulis untuk pengembangan pada alat selanjutnya yaitu pada *interface augmented reality* akan lebih baik apabila ditambahkan konten untuk memberikan perintah seperti menyalakan lampu atau memberi pakan penyus.

Daftar Pustaka

- Aluh, M., & Lidyawati, L. (2018). IOT BERBASIS SISTEM SMART HOME MENGGUNAKAN NODEMCU V3. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 3(2), 138–149. <https://doi.org/10.52447/JKTE.V3I2.1225>
- Ariani, F., Marpitalia, M., Erlangga, E., & Yulfriwini, Y. (2019). SISTEM PAKAR DIAGNOSA PENYAKIT PADA AYAM BROILER DENGAN METODE FORWARD CHAINING. *EXPERT: Jurnal Manajemen Sistem Informasi dan Teknologi*, 9(1). <https://doi.org/10.36448/jmsit.v9i1.1227>
- Ariani, F., Vandika, A. Y., & Widjaya, H. (2019). IMPLEMENTASI ALAT PEMBERI PAKAN TERNAK MENGGUNAKAN IOT UNTUK OTOMATISASI PEMBERIAN PAKAN TERNAK. *Explore: Jurnal Sistem Informasi dan Telematika (Telekomunikasi, Multimedia dan Informatika)*, 10(2). <https://doi.org/10.36448/JSIT.V10I2.1315>
- Durani, H., Sheth, M., Vaghasia, M., & Kotech, S. (2018). Smart Automated Home Application using IoT with Blynk App. *International Conference Inventive Communication and Computational Technologies*, 393–397. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473224>
- Efendi, Y. (2018). Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile. *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Al Asyariah Mandar*, 4(2), 21–27. <https://doi.org/10.35329/JIJK.V4I2.41>
- Endra, R. Y., Cucus, A., & Affandi, F. N. (2019). The Concept and Implementation of Smart Room using Internet of things (IoT) for Cost Efficiency and Room Security. *Journal of Physics: Conference Series*, 1381(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1381/1/012018>

- Nurazizah, E., Ramdhani, M., & Rizal, A. (2017). Rancang Bangun Termometer Digital Berbasis Sensor Ds18b20 Untuk Penyandang Tunanetra. *eProceedings of Engineering*, 4(3). <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/4858>
- Rindra, A. K., Widodo, A., Baskoro, F., & Kholis, N. (2022). Sistem Monitoring Level Ketinggian Air Pada Tandon Rumah Tangga Berbasis Iot (Internet Of Things). *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 11(1), 17–22. <https://doi.org/10.26740/JTE.V11N1.P17-22>
- Risno, D., Fuad Azis, M., & Arief, R. (2022). Strategi Peningkatan Pelayanan Air Minum Di Kelurahan Buntusu Kota Makassar. *Journal of Urban Planning Studies*, 3(1), 68–77. <https://doi.org/10.35965/JUPS.V3I1.321>
- Safitri, H. R. (2019). RANCANG BANGUN ALAT PEMBERI PAKAN DAN PENGGANTI AIR AQUARIUM OTOMATIS BERBASIS ARDUINO UNO. *JiTEKH*, 7(1), 29–33. <https://doi.org/10.35447/JITEKH.V7I01.14>
- Saleh, M., & Haryanti, M. (2017). RANCANG BANGUN SISTEM KEAMANAN RUMAH MENGGUNAKAN RELAY. *Jurnal Teknologi Elektro*, 8(2). <https://doi.org/10.22441/JTE.V8I2.1601>
- Umam, K. G. L. (2018). Smart Kandang Ayam Petelur Berbasis Internet of Things untuk Mendukung SDGS 2030 (Sustainable Development Goals). *Jurnal Teknoinfo*, 12(2), 43–48. <https://doi.org/10.33365/JTI.V12I2.86>
- Wahyuningsih, F. T., Hakim, Y. Al, & Ashari, A. (2019). Pengembangan Alat Peraga Pengukur Debit Air Menggunakan Sensor Flow Berbasis Arduino Sebagai Media Pembelajaran Fluida. *Radiasi*, 12(1), 38–45. <https://doi.org/10.37729/RADIASI.V12I1.31>
- Wirajaya, M. R., Abdussamad, S., & Nasibu, I. Z. (2020). Rancang Bangun Mesin Penetas Telur Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2(1), 24–29. <https://doi.org/10.37905/JJEEE.V2I1.4579>

Model Efisiensi Arus pada Elektrolisis Serbuk Tembaga Menggunakan Metode Perancangan Percobaan Faktorial Desain 2^K

R. Mohamad Fajar Gunawan¹, Soleh Wahyudi¹, Andrie Harmaji¹, Diana Kamaliyah Ichsan¹,
Gigih Safardwiyansyah¹, dan Naufal Dhiya Ulhaq¹

¹Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Dan Desain, Institut Teknologi Sains Bandung,
Kota Deltamas Lot-A1 CBD, Jl. Ganesha Boulevard, Cikarang Pusat, Jawa Barat 17530, Indonesia

gunawanfajar656@gmail.com, solehwahyudi@yahoo.com, harmaji.a@gmail.com,
dianakamaliyah038@gmail.com, gigih.safar@gmail.com, naufalulhaqhaq@gmail.com

Abstrak

Dalam *paper* ini disampaikan hasil pengembangan model efisiensi arus pada elektrolisis serbuk tembaga dan menganalisis faktor yang paling berpengaruh terhadap efisiensi arus menggunakan perancangan percobaan faktorial 2^K . Tiga variabel bebas yang dipertimbangkan adalah konsentrasi ion tembaga (Cu), rapat arus, dan waktu elektrolisis. Percobaan elektrolisis serbuk tembaga dilakukan dengan menggunakan anoda plat tembaga murni (99,88% Cu) dan katoda dari stainless steel 316L. Efisiensi arus dihitung berdasarkan data berat serbuk tembaga yang dihasilkan. Karakterisasi serbuk tembaga menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui morfologi dan distribusi ukuran serbuk, *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fasa/senyawa serbuk, *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) untuk menganalisis komposisi unsur dan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui ukuran partikel serbuk dan distribusinya. Dengan model prediksi diperoleh efisiensi arus tertinggi sebesar 96%. Serbuk tembaga yang dihasilkan memiliki morfologi berstruktur dendritik dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 114,9 μm serta bersenyawa *cuprite* (Cu_2O) dan tembaga (Cu) dengan komposisi 88,17% Cu dan 11,83% O.

Kata kunci: Faktorial Desain 2^K , Minitab, Elektrolisis, Efisiensi Arus, Serbuk Tembaga

Abstract

This paper presents the results of developing a current efficiency model for copper powder electrolysis and analyzes the factors that most influence current efficiency using a 2^K factorial experimental design. The three independent variables are copper ion (Cu) concentration, current density, and electrolysis time. Copper powder electrolysis experiments were conducted using a pure copper plate anode (99.88% Cu) and a 316L stainless steel cathode. Current efficiency is calculated based on data on the weight of the copper powder produced. Copper powder characterization uses a Scanning Electron Microscope (SEM) to determine the morphology and size distribution of the powder, X-ray Diffraction (XRD) to identify powder phases/compounds, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) to analyze the elemental composition and Particle Size Analyzer (PSA) to determine the powder particle size and distribution. The prediction model obtains the highest current efficiency at 96%. The resulting copper powder has a dendritic structure morphology with an average particle size of 114.9 μm . It comprises cuprite (Cu_2O) and copper (Cu) with a composition of 88.17% Cu and 11.83% O.

Keywords: 2^K Design Factorial, Minitab, Electrolysis, Current Efficiency, Copper Powder

1. Pendahuluan

Tembaga memiliki sifat konduktivitas listrik yang sangat baik sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan utama maupun paduan untuk pembuatan komponen elektronik dan listrik (Schlesinger dkk., 2011). Tembaga juga bersifat antimikroba (Grass dkk., 2011). Dalam bentuk serbuk, tembaga merupakan salah satu produk hilir dari logam tembaga yang dibutuhkan untuk beberapa aplikasi dan komponen dari suatu produk (Mubarok & Wahyudi, 2017). Serbuk tembaga dalam senyawa tembaga oksida dapat digunakan sebagai bahan campuran pupuk, industri kimia dan aplikasi spesifik lainnya (Mubarok & Wahyudi, 2017). Ada beberapa metode pembuatan serbuk diantaranya adalah dengan mekanik (*Mechanical atau Pulverization*), kimia (*Chemical*), elektrolisis (*Electrolytic Deposition*), dan atomisasi (*Atomization*) (Henny Mulyani dkk., 2019).

Elektrolisis serbuk tembaga memiliki rentang efisiensi arus (*current efficiency*) dan ukuran partikel yang lebar. Dari hasil penelitian yang pernah dilakukan terdapat rentang efisiensi arus yang cukup lebar yaitu 49-63% (Damisah dkk., 2015) dan 60-80% (Nekouei dkk., 2013) dengan faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi arus diantaranya

Info Makalah:

Dikirim : 07-20-23;

Revisi 1 : 11-07-23;

Revisi 2 : 01-22-24;

Diterima : 01-26-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : solehwahyudi@yahoo.com

adalah konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis. Efisiensi arus merupakan perbandingan nilai berat logam yang terendapkan di katoda atau berat logam yang dihasilkan (berat logam aktual) dengan nilai berat logam yang terendapkan secara teoritis pada proses elektrolisis. Adapun efisiensi arus pada metode elektrolisis dinyatakan dengan persamaan (1) (Hurin, 2019):

$$Efisiensi\ Arus = \frac{W_{actual}}{W_{teoritis}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{teoritis} = \frac{(BA \times I \times t)}{(n \times 96500)} \quad (2)$$

Metode perancangan percobaan (*Design of Experiment*) faktorial 2^K dapat digunakan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh (Montgomery, 2020). Selanjutnya dengan menggunakan *software* Minitab, tabel perancangan percobaan faktorial 2^K dapat dikembangkan untuk mendapatkan model regresi untuk prediksi efisiensi arus pada sintesis serbuk tembaga (Allen, 2019). Perancangan percobaan faktorial 2^K , memiliki arti dimana angka 2 pada 2^K menunjukkan 2 tingkatan nilai pada masing-masing faktor yang diteliti yaitu tingkatan rendah dan tinggi sedangkan parameter (K) mewakili faktor yang akan diteliti. Terdapat 3 faktor elektrolisis yang akan diteliti yaitu konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis.

Tabel *Analysis of Variance* (ANOVA) merupakan rekapitulasi hasil perhitungan masing-masing faktor berdasarkan tabel perancangan percobaan faktorial 2^K . Berdasarkan nilai F_{value} yang ditampilkan di tabel ANOVA akan dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh. Nilai F_{value} dihasilkan dengan menggunakan persamaan (3) dan (4):

$$SS_{model} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{BC} + SS_{AC} + SS_{ABC} \quad (3)$$

$$F_{value} = \frac{MS_{model}}{MS_{error}} \quad (4)$$

Hasil eksperimen menggunakan faktorial desain 2^K dapat dengan mudah dinyatakan dalam bentuk respon model regresi dijelaskan oleh persamaan polinomial derajat pertama (Hribernik dkk., 2009):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_{i \times i} + \sum_{i < j} \sum \beta_{i \times \dots \times i \dots \times j} + \varepsilon \quad (5)$$

Dengan menggunakan perancangan percobaan faktorial 2^3 diharapkan dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh pada proses elektrolisis serbuk tembaga. Dan dengan dikembangkannya model prediksi efisiensi arus yang melibatkan faktor konsentrasi ion tembaga, rapat arus dan waktu elektrolisis diharapkan dapat dimanfaatkan untuk menetapkan kondisi operasional proses elektrolisis agar dihasilkan efisiensi arus yang optimum.

2. Metode

Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi ion Cu (0,02–0,2) mol/liter, rapat arus (0,05–0,2) A/cm² dan waktu elektrolisis (300–1200) detik. Proses elektrolisis dilakukan di suhu ruangan (25°C) dengan menggunakan bahan tembaga sulfat (CuSO₄.H₂O) dan asam sulfat (H₂SO₄). Endapan serbuk yang terbentuk di *scrapping* menggunakan alat *ultrasonic* dan selanjutnya dibilas dengan aquades dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C. Serbuk yang telah kering kemudian ditimbang untuk kemudian dihitung efisiensi arusnya. Serbuk yang dihasilkan pada efisiensi tertinggi dilakukan uji SEM untuk mengetahui morfologi serbuk dan distribusi ukuran serbuk, uji EDX untuk mengetahui komposisi unsur serbuk tembaga, uji XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk dan uji PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikelnya.

2.1. Proses Elektrolisis Serbuk Tembaga

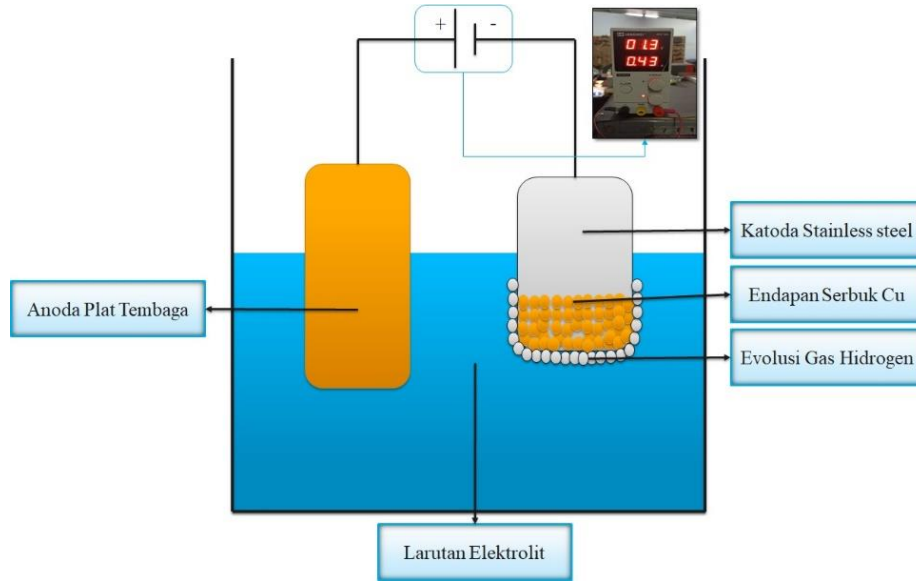
Serbuk tembaga disintesis melalui metode elektrolisis. Larutan elektrolit terdiri dari *copper sulfate* (CuSO₄.5H₂O), asam sulfat (H₂SO₄) dan amidis (aquades). Pengujian *optical emission spectroscopy* (OES) pada anoda tembaga menunjukkan kadar Cu sebesar 99,88%. Preparasi plat tembaga berukuran 7 cm × 2,5 cm sebagai anoda dan plat *stainless steel* 316L berukuran 6 cm × 2,5 cm sebagai katoda. Ukuran terendamnya adalah 4,5×2,5 cm untuk anoda dan 3,5×2,5 cm untuk katoda. Hubungkan DC *power supply* dengan anoda tembaga ke kutub positif (+) dan untuk katoda SS 316L ke kutub negatif (-). Skema sel elektrolisis serbuk tembaga ditampilkan pada Gambar 1.

Variasi percobaan menggunakan 3 variabel bebas, yakni konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu proses. Variasi konsentrasi Cu adalah 0,02–0,2 (mol/liter), variasi rapat arus yang digunakan adalah 0,05–0,2 (A/cm²), dan waktu proses yang digunakan adalah 300–1200 (detik). Tingkatan nilai terendah dan tertinggi di masing-masing parameter ditampilkan dalam Tabel 1.

2.2. Faktorial Desain 2^K

Faktorial Desain 2^K adalah faktor K, dengan masing-masing faktor hanya menampilkan dua tingkatan nilai (nilai minimum dan maksimum). Replikasi lengkap dari desain semacam itu membutuhkan $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^K$ pengamatan.

Terdapat 3 faktor ($K = 3$) variabel independen yang digunakan yaitu rapat arus (A), waktu (B) dan konsentrasi ion Cu (C).



Gambar 1. Skema Sel Elektrolisis Serbuk Tembaga.

Tabel 1. Penamaan Faktor serta Nilai Terendah dan Tertinggi di Masing-Masing Parameter Elektrolisis.

Parameter	Faktor	Level	
		Minimum	Maksimum
Rapat Arus (A/cm^2)	A	0,05	0,2
Waktu (menit)	B	5	20
Konsentrasi Cu (M)	C	0,02	0,2

2.3. Verifikasi Hasil Model Prediksi dengan Hasil Percobaan

Model prediksi efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga yang telah dihasilkan kemudian dilakukan verifikasi dengan hasil percobaan pada kondisi operasional tertentu. Nilai efisiensi arus dari hasil model dengan hasil percobaan kemudian diuji secara statistik menggunakan T-test pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

3. Hasil dan Pembahasan

Data lengkap dari hasil percobaan yang menghasilkan nilai efisiensi arus pada variasi konsentrasi ion Cu, rapat arus dan waktu elektrolisis tercantum dalam Tabel 2. Dari data tersebut, nilai efisiensi yang tertinggi sebesar 96% dicapai pada kondisi konsentrasi ion Cu sebesar 0,2 M, waktu elektrolisis sebesar 20 menit dan rapat arus sebesar 0,05 A/cm^2 (sampel No. 8). Pada kondisi tersebut sangat ideal atau optimal untuk sintesis serbuk tembaga dengan metode elektrolisis. Selanjutnya, pembahasan akan disampaikan terkait faktor yang paling berpengaruh pada elektrolisis serbuk tembaga, pengembangan model efisiensi arus pada elektrolisis serbuk tembaga, hasil model prediksi efisiensi arus, dan karakteristik serbuk tembaga.

3.1. Faktor Yang Paling Berpengaruh Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Tabel 3 menampilkan ANOVA hasil pengolahan data menggunakan *software* Minitab dari data efisiensi arus di Tabel 2. Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa faktor konsentrasi ion tembaga merupakan faktor yang paling berpengaruh karena memiliki nilai F_{value} paling besar dan P_{value} paling kecil. Lalu disusul faktor rapat arus. Faktor waktu tidak berpengaruh pada efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga karena nilai F_{value} paling kecil dan P_{value} besar melebihi nilai α . Kondisi tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh dari penelitian (Sopiah, 2008), dimana agar diperoleh efisiensi arus tinggi maka harus digunakan konsentrasi logam yang tinggi dan rapat arus yang kecil. Dengan tingginya konsentrasi logam dalam larutan elektrolit maka volume gas hidrogen yang terbentuk menurun sehingga reaksi terbentuknya serbuk tembaga menjadi lebih dominan dan dapat meningkatkan efisiensi arus.

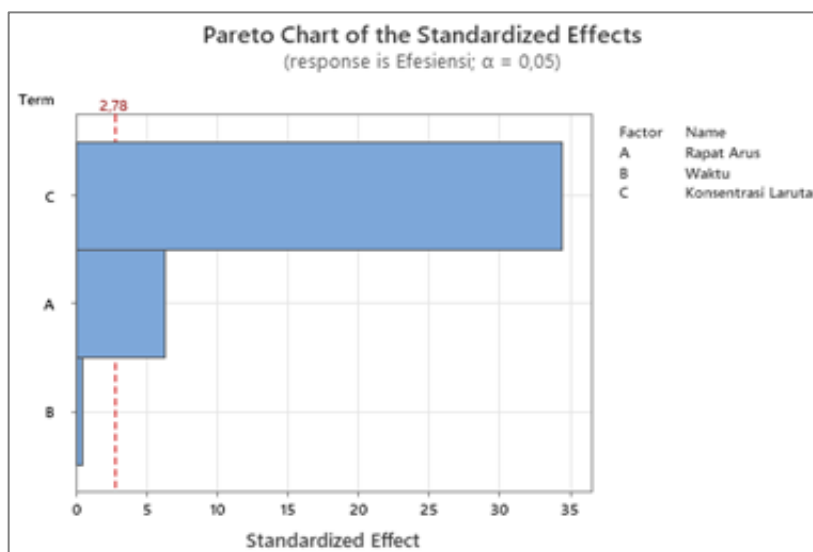
Tabel 2. Data Perolehan Nilai Efisiensi Arus Sesuai Rancangan Percobaan Faktorial 2³.

Sampel	Konsentrasi Ion Cu (M)	Waktu Elektrolisis (menit)	Rapat Arus (A/cm ²)	Berat Cu sesungguhnya (gram)	Berat Cu Teoritis (gram)	Efisiensi Arus (%)
1	0,02	5	0,05	0,011	0,042	26
2	0,02	5	0,2	0,016	0,172	9
3	0,02	20	0,2	0,073	0,691	11
4	0,02	20	0,05	0,034	0,169	20
5	0,2	5	0,2	0,136	0,172	79
6	0,2	5	0,05	0,039	0,042	92
7	0,2	20	0,2	0,575	0,691	83
8	0,2	20	0,05	0,163	0,169	96

Tabel 3. Data Perolehan ANOVA untuk Menentukan Faktor yang Paling Berpengaruh.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F-Value	P-Value	
Rapat Arus	1	338,0	338,0	39,76	0,003	Significant
Waktu	1	2,0	2,0	0,24	0,653	Not Significant
Konsentrasi Cu	1	10082,0	10082,0	1186,12	0,000	Significant
Error	4	34,0	8,5			
Total	7	10456,0				

Hasil yang diperoleh dari olah data menggunakan Minitab adalah diagram Pareto. Diagram Pareto juga dapat menunjukkan faktor yang paling berpengaruh. Diagram Pareto dari hasil olah data Tabel 2 menggunakan Minitab ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa konsentrasi ion tembaga merupakan faktor yang paling berpengaruh pada efisiensi arus. Parameter rapat arus masih merupakan faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi arus. Namun, parameter waktu elektrolisis tidak berpengaruh pada efisiensi karena nilainya lebih rendah dari batas 2,78 yang merupakan garis α .



Gambar 2. Tampilan Diagram Pareto.

Secara visual, proses elektrolisis yang berlangsung pada konsentrasi ion Cu nya tinggi, serbuk tembaga yang dihasilkan relatif lebih banyak dan evolusi gas hidrogen yang terbentuk sangat rendah. Tapi, jika konsentrasi ion Cu nya rendah maka evolusi gas hidrogen yang terbentuknya lebih banyak dan serbuk tembaga yang dihasilkan relatif sedikit. Selanjutnya pada variasi rapat arus sebagai faktor kedua yang mempengaruhi nilai efisiensi arus, secara visual, proses elektrolisis pada rapat arus yang rendah menunjukkan reaksi evolusi gas hidrogen lebih rendah dibandingkan pada rapat arus tinggi.

3.2. Pengembangan Model Efisiensi Arus Pada Elektrolisis Serbuk Tembaga

Model prediksi yang dihasilkan dari olah data Tabel 2 menggunakan *software* Minitab ditampilkan pada persamaan (6) dan untuk mengetahui tingkat validitasnya, digunakan ANOVA untuk model prediksi tersebut. Sebuah model persamaan dinyatakan valid jika memiliki *P-value* yang sangat rendah dan *R-square* yang mendekati 100% (Montgomery, 2020). Data perolehan ANOVA untuk model prediksi ditampilkan dalam Tabel 4. Berdasarkan Tabel

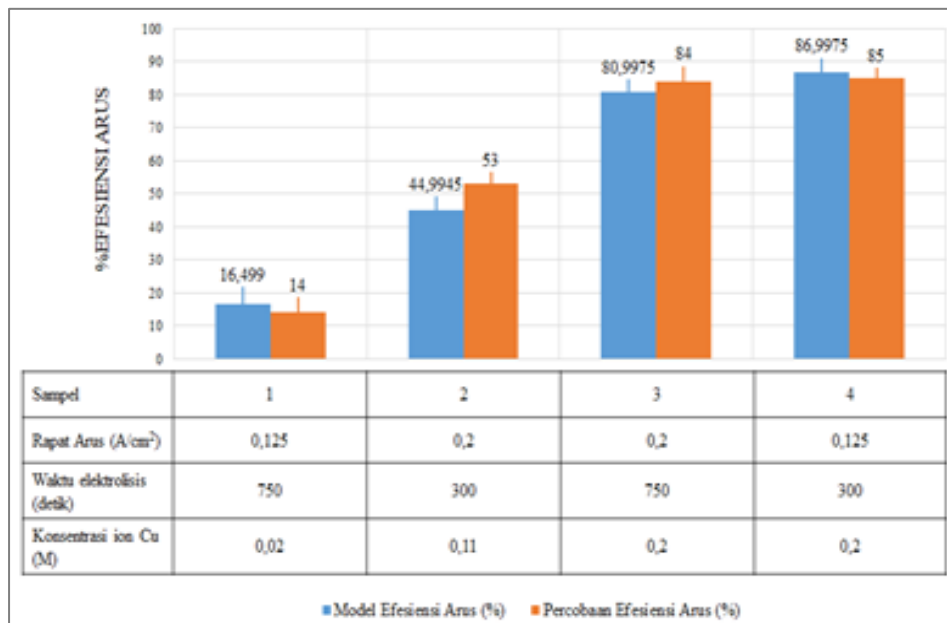
4, model prediksi efisiensi arus elektrolisis serbuk tembaga sangat valid. Hal tersebut ditunjukkan dari nilai *P-Value* yang sangat rendah dan nilai *R-square* yang mencapai 99,67%

$$\text{Efisiensi Arus} = 18,61 - (86,7 \times \text{Rapat Arus}) + (0,067 \times \text{Waktu}) + (1,5778 \times \text{Konsentrasi Cu}) \quad (6)$$

Tabel 4. Data Perolehan ANOVA untuk Model Prediksi.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F-Value	P-Value	
Model	3	10422,0	3474,0	408,71	0,000	Significant
R-Square		Adj-R-Square		R-Square Pred		
99,67%		99,43%		98,70%		

Selanjutnya, hasil model prediksi tersebut diverifikasi dengan hasil percobaan. Perbandingan efisiensi arus antara hasil model prediksi dengan percobaan pada kondisi operasional yang dibuat acak ditampilkan pada Gambar 3. Selanjutnya, dari data efisiensi arus tersebut diuji secara statistik dengan metode T-test untuk membuktikan hipotesis bahwa efisiensi arus dari model prediksi sama dengan efisiensi arus dari hasil percobaan. Hipotesis tersebut terbukti jika syarat nilai $T_{hitung} (|t_0|)$ lebih kecil dari nilai $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ (Montgomery, 2020). Uji T-test antara data efisiensi dari hasil model prediksi dengan efisiensi arus dari hasil percobaan ditampilkan pada Tabel 5. Berdasarkan perhitungan T-test diperoleh $T_{hitung} (|t_0|)$ sebesar -0,661 dan dari pengecekan tabel distribusi T pada tingkat kepercayaan 95% dengan derajat kebebasan 3 diperoleh $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ sebesar 3,182. Dengan demikian $T_{hitung} (|t_0|)$ lebih kecil dari $T_{tabel} (t_{0,025,3})$ sehingga hipotesis bahwa efisiensi arus dari model prediksi sama dengan efisiensi harus dari hasil percobaan telah terbukti secara statistik.



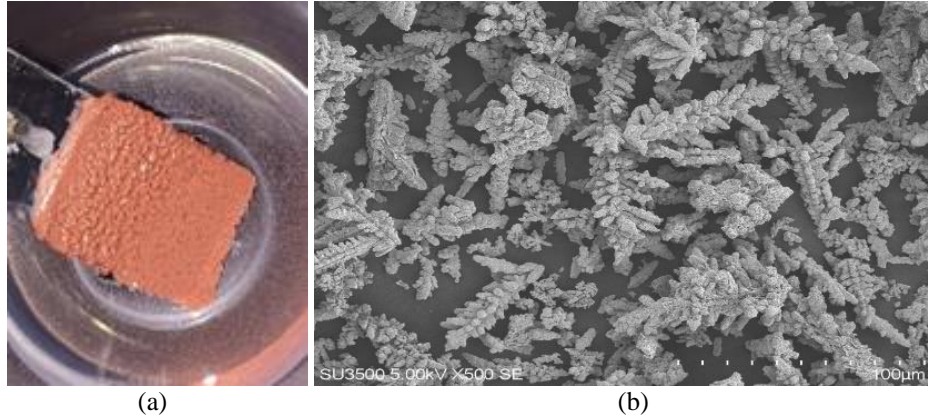
Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Arus dari Hasil Model Prediksi dengan Hasil Percobaan (*Real*).

Tabel 5. Hasil Pengujian T-test Efisiensi Arus Antara Model dan *Real*.

Sampel	Efisiensi Arus (%)		$d_j = \eta_{model} - \eta_{real}$	$(d_j - \bar{d}_j)^2$
	Model	Real		
1	80,997	84	-3,003	1,891
2	16,499	14	2,499	17,030
3	44,995	53	-8,006	40,669
4	86,998	85	1,998	13,146
	\bar{d}_j		-1,628	
	$\Sigma(d_j - \bar{d}_j)^2$			72,737
	S_d		4,924	
	$ t_0 $		-0,661	
	$t_{0,025,3}$		3,182	

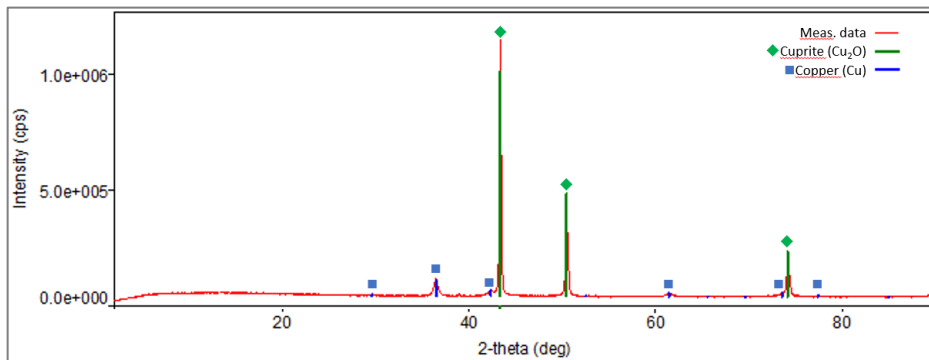
3.3. Karakteristik Serbuk Tembaga

Serbuk tembaga yang dikarakterisasi berasal dari serbuk yang dihasilkan saat tercapai efisiensi arus 96%. Tampak pada Gambar 4(a) foto endapan serbuk tembaga yang masih menempel pada permukaan katoda dan jika serbuk tersebut telah dikeringkan lalu diamati dengan SEM, tampak tampilan partikel serbuknya berbentuk dendritik. Foto SEM serbuk tembaga dapat dilihat pada Gambar 4 (b).

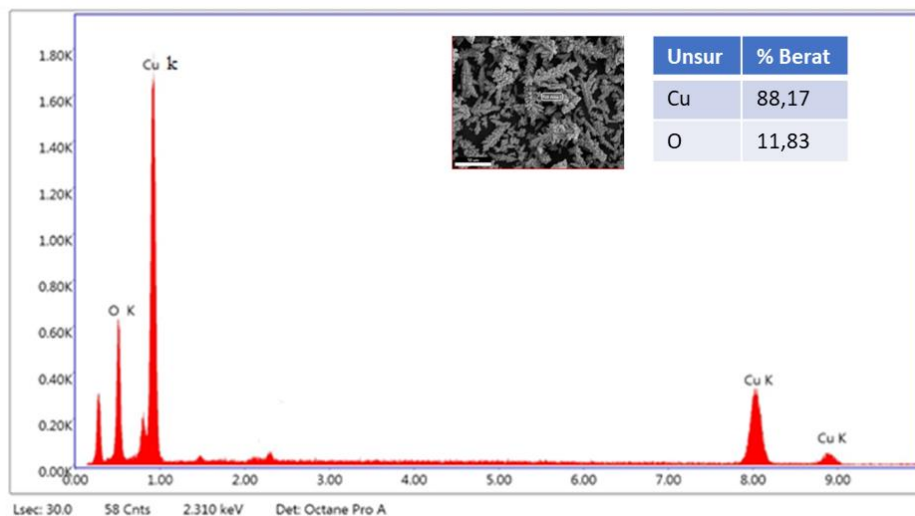


Gambar 4. (a) Serbuk Tembaga yang Masih Menempel pada Permukaan Katoda dan (b) Partikel Serbuk Tembaga Hasil Foto SEM.

Gambar 5 menampilkan hasil XRD serbuk tembaga yang telah dikeringkan dalam oven pada suhu 10°C. Berdasarkan hasil XRD diketahui bahwa terdapat serbuk yang berunsur tembaga (Cu) dan serbuk yang bersenyawa cuprite (Cu_2O). Gambar 6 menampilkan hasil uji EDX dimana diketahui komposisi serbuk tembaga terdiri atas 88,17% Cu dan 11,83% O.

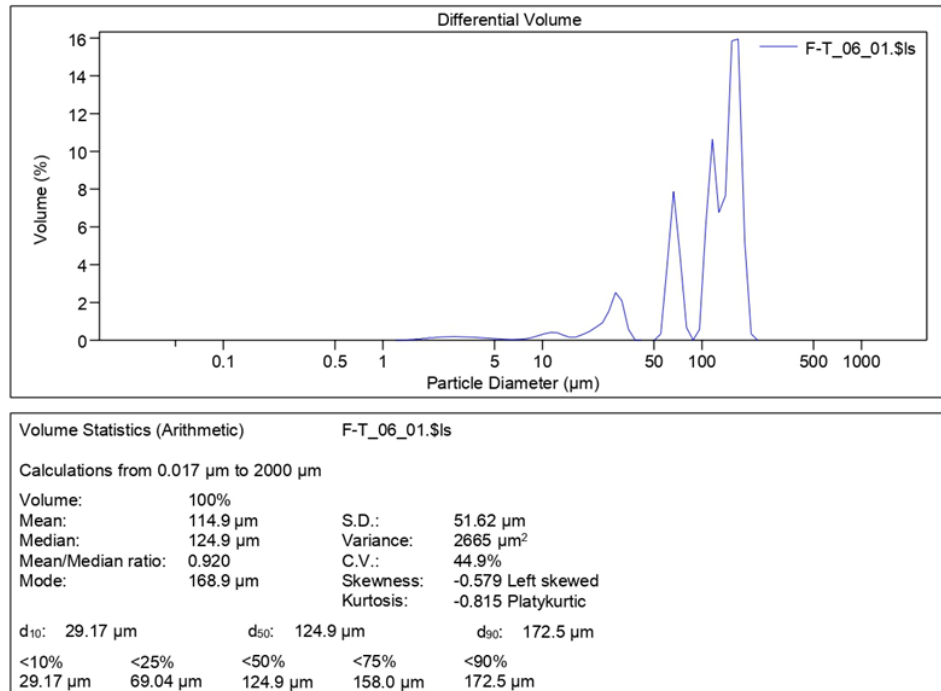


Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian XRD Serbuk Tembaga.



Gambar 6. Hasil Uji EDX Serbuk Tembaga.

Selanjutnya, pada Gambar 7, ditampilkan hasil uji PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel serbuk tembaga. Berdasarkan Gambar 7 diketahui bahwa ukuran rata-rata partikel serbuk tembaga adalah sebesar 114,9 μm .



Gambar 7. Hasil Pengujian PSA Serbuk Tembaga.

Kesimpulan

Faktor yang paling berpengaruh dalam proses elektrolisis serbuk tembaga adalah konsentrasi ion tembaga. Efisiensi arus dapat diprediksi menggunakan model persamaan (7) yang dihasilkan dari perancangan percobaan faktorial 2^3 dengan 3 parameter yakni: rapat arus (A), waktu elektrolisis (B) dan konsentrasi ion Cu (C) pada rentang kondisi operasional rapat arus 0,05-0,2 A/cm^2 , waktu elektrolisis 5-20 menit dan konsentrasi ion tembaga 0,02-0,2 M.

$$\text{Efisiensi Arus} = 18,61 - (86,7 \times A) + (0,067 \times B) + (1,5778 \times C) \quad (7)$$

Nilai efisiensi arus yang dicapai dalam penelitian ini adalah 9-96 %. Serbuk tembaga dari sampel efisiensi arus 96% memiliki bentuk dendritik dengan ukuran rata-rata partikelnya sebesar 114,9 μm , serta berupa Cu dan Cu_2O dengan komposisi 88,17% Cu dan 11,83% O.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kemendikbudristek Republik Indonesia dalam program *Matching Fund* Kedaireka tahun 2022. PT. Rekayasa *Plating* yang telah menyediakan fasilitas dan perlengkapan selama penelitian ini berlangsung. Serta panitia BKPMi-SENAMM 2022 di Universitas Jend. A. Yani yang telah menerima artikel kami untuk diikutsertakan dalam kegiatan seminar.

Daftar Notasi

$W_{teoritical}$	= Berat endapan teoritis [gram]
W_{actual}	= Berat endapan yang diperoleh dari hasil percobaan [gram]
Y	= Respon (variabel dependen)
β_i	= Koefisien model regresi
β_0	= Nilai konstanta
X_i	= Coded variable
ε	= Random error
η	= Efisiensi arus [%]
I	= Arus listrik [A]
t	= Waktu elektrolisis [s]
BA	= Massa atom relatif [gram/mol]
n	= Valensi

Daftar Pustaka

- Allen, T. T. (2019). Software Overview and Methods Review: Minitab. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Six Sigma*, 575–600. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7420-2_24
- Damisih, D., Fidyarningsih, R., Deca Pravitasari, R., Agustanhakri, A., Aprilia, L., & Purwati, H. (2015). Pembuatan Serbuk Tembaga Berukuran Di Bawah 1 Mikron dengan Metode Elektrolisis. *PROSIDING SEMINAR NASIONAL FISIKA (E-JOURNAL)*, 4, SNF2015-VII-127–132. <https://doi.org/10.21009/03>
- Grass, G., Rensing, C., & Solioz, M. (2011). Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and environmental microbiology*, 77(5), 1541–1547. <https://doi.org/10.1128/AEM.02766-10>
- Henny Mulyani, R., Carisca Tanjung, Y., Djoko, D., & Prajitno, H. (2019). The Effect of Variations in Current and Time to Manufacture Powder Tin (Sn) via Electrodeposition Process. *Jurnal Kartika Kimia*, 2(1), 7–16. <https://doi.org/10.26874/JKK.V2I1.21>
- Hribernik, A., Bauman, M., & Lobnik, A. (2009). APPLICATION OF 2 k FACTORIAL DESIGN IN WASTEWATER DECOLORIZATION RESEARCH. *19th IMEKO World Congress*, 2225–2229.
- Hurin, F. R. (2019). *Pengaruh Penambahan Aditif Tiourea Terhadap Komposisi Oksigen pada Sintesis Serbuk Tembaga dengan Metode Elektrolisis* [Institut Teknologi Sains Bandung]. https://repository.itsb.ac.id/index.php?p=show_detail&id=562
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*, 10th Edition, Wiley. Wiley, 1–682. <https://www.wiley.com/en-us/Design+and+Analysis+of+Experiments%2C+10th+Edition-p-9781119492443>
- Mubarok, Z., & Wahyudi, S. (2017). Sintesis Serbuk Tembaga dengan Metode Elektrolisis: Studi Perilaku Elektrokimia dan Karakterisasi Serbuk. *Seminar Nasional Metalurgi dan Material (SENAMM) X 2017*, 623–632. <https://www.researchgate.net/publication/336721014>
- Nekouei, R. K., Rashchi, F., & Amadeh, A. A. (2013). Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis. *Powder Technology*, 237, 165–171. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2013.01.032>
- Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). Extractive Metallurgy of Copper. *Extractive Metallurgy of Copper*, 1–455. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64841-3>
- Sopiah, S. (2008). *Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrolisis Larutan CuSO4 Sebagai Bahan Kajian dalam Pembuatan Modul Praktikum dan Pembelajaran Elektronik* [Institut Teknologi Bandung]. <https://digilib.itb.ac.id/index.php/gdl/view/9280>

Karakteristik Termal Material Komposit Berbahan Dasar Polipropilena dan Batang Pisang

Gusti Umindya Nur Tajalla¹, Prisky Andriansyah¹, Ilham Tri Riyadi¹,
Mei Lisa Nur Vadila¹, dan Andromeda Dwi Laksono¹

¹Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

gusti.unt@lecturer.itk.ac.id, 06151034@student.itk.ac.id, 06161028@student.itk.ac.id,
06191032@student.itk.ac.id, andromeda@lecturer.itk.ac.id

Abstrak

Penggunaan insulasi termal pada hunian dapat menjadi solusi untuk menjaga suhu di dalam ruangan agar kenyamanan dalam bekerja dan beristirahat dapat optimum. Salah satu bahan ramah lingkungan yang dapat digunakan sebagai insulasi termal adalah serat batang pisang (BP) karena nilai konduktivitas termalnya yang rendah, yaitu 0,1166 W/mK, sedangkan matriksnya menggunakan polipropilena (PP). Produksi polipropilena yang tinggi dapat menyebabkan pencemaran lingkungan sehingga polipropilena daur ulang (PPDU) perlu dipelajari untuk dapat dijadikan matriks pada insulasi termal. Penelitian ini menggunakan *compression molding* pada tekanan 8 MPa dan temperatur 170°C selama 60 menit dengan variasi fraksi volume serat batang pisang sebesar 10%, 30% dan 50% dan variasi jenis matriks, yaitu PP dan PPDU. Kemudian, hasil manufaktur dikarakterisasi menggunakan uji densitas dan uji konduktivitas termal. Hasil pengujian densitas pada BP/PP dan BP/PPDU menurun seiring dengan penambahan fraksi volume berturut-turut. Hal ini dapat terjadi akibat pembentukan *void* selama proses manufaktur berlangsung. Selain itu, nilai konduktivitas termal masing-masing meningkat dari 0,37 ke 0,89 W/mK untuk BP/PP dan dari 0,58 ke 0,94 W/mK untuk BP/PPDU. Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil fraksi volume serat akan menghasilkan nilai konduktivitas termal lebih rendah. Begitu pula dengan penggunaan PP murni yang lebih diminati karena memberikan nilai konduktivitas yang lebih rendah dibanding PPDU.

Kata kunci: material insulasi panas, komposit, batang pisang, polipropilena, polipropilena daur ulang

Abstract

Thermal insulation in a residence can help keep the room's temperature stable, allowing maximum comfort at work and relaxation. Because of its low thermal conductivity value of 0.1166 W/mK, banana stem fiber (BP) is an environmentally friendly thermal insulation material, while the matrix uses polypropylene (PP). Because excessive polypropylene production can pollute the environment, recycled polypropylene (PPDU) should be investigated as a candidate matrix. This study employs compression molding at a pressure of 8 MPa and a temperature of 170 °C for 60 minutes, with volume fractions of banana stem fibers varying by 10%, 30%, and 50%, as well as different matrix types, namely PP and PPDU. The manufacturing results were then evaluated using density and thermal conductivity tests. The density testing results for BP/PP and BP/PPDU decreased as more volume fractions were added. This phenomenon can occur as a result of void formation during the manufacturing process. Furthermore, the thermal conductivity values for BP/PP increased from 0.37 to 0.89 W/mK and from 0.58 to 0.94 W/mK for BP/PPDU, respectively. The lower the thermal conductivity value, the smaller the volume fraction of fiber. Similarly, pure PP is preferable because it has lower conductivity values than PPDU.

Keywords: thermal insulation material, composite, banana stem, polypropylene, recycled polypropylene

1. Pendahuluan

Konsep *green building* dalam pembangunan infrastruktur saat ini menjadi perhatian khusus dalam rangka mengimplementasikan *sustainability development goals* (SDGs). Konsep ini mengutamakan kenyamanan dan kesehatan orang-orang yang tinggal di dalamnya. Salah satu faktor yang mempengaruhi kenyamanan adalah sirkulasi temperatur antara di luar dan di dalam ruangan, karena temperatur dalam ruangan dipengaruhi oleh cuaca yang terjadi. Sebagai contoh, ketika musim panas temperatur di dalam ruangan akan cenderung naik dan ketika musim dingin temperatur di dalam ruangan cenderung menurun. Hal ini dapat mempengaruhi kenyamanan dalam bekerja dan beristirahat. Jika kenyamanan ini tidak terpenuhi, dampak yang lebih buruk akan terjadi, seperti kelelahan, kehilangan fokus, dan depresi. Oleh sebab itu, sebagian besar masyarakat menggunakan *air conditioner* (AC) untuk mengatur

temperatur ruangan sesuai dengan kebutuhan. Namun, penggunaan teknologi tersebut dapat meningkatkan konsumsi energi dan gas emisi rumah kaca yang dapat memperparah pemanasan global (Rosmayanti, 2019).

Penggunaan insulasi termal pada bangunan dapat menjadi solusi yang dapat dipertimbangkan. Insulasi termal ini berguna untuk menjaga temperatur di dalam ruangan agar secara minimum terpengaruh oleh temperatur di luar ruangan. Insulasi berusaha untuk menjaga sebaik mungkin temperatur di dalam

Info Makalah:

Dikirim : 07-21-23;

Revisi 1 : 01-25-24;

Diterima : 02-13-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : gusti.unt@lecturer.itk.ac.id

tetap nyaman dan stabil (Pavel & Blagoeva, 2018). Penggunaan insulasi termal cukup diminati di Eropa dimana cuaca panas dan dingin yang ekstrim terjadi. Rusia menjadi salah satu negara dengan permintaan insulasi termal terbanyak saat ini. Pada 2015, total belanja untuk insulasi termal mencapai USD 25.000. Lebih dari 50% penggunaan insulasi termal berjenis *mineral wool* yang lebih diminati karena kualitas menghambatnya yang baik atau memiliki konduktivitas termal rendah, yaitu 0,035 W/m.K (Yunianto, 2020). Walaupun demikian, insulasi jenis ini diproduksi dengan menggunakan temperatur tinggi, yaitu 1.350–1.500°C (Berber, 2020). Temperatur yang tinggi akan melepaskan karbondioksida (CO₂) sehingga dapat menyebabkan efek rumah kaca (Pratama, 2019). Selain itu, pelepasan gas beracun dapat memicu permasalahan pada pernapasan. Konsumsi energi yang tinggi juga memberi dampak pada biaya produksi yang meningkat. Oleh karena itu, perlu adanya alternatif material insulasi termal yang baik untuk kesehatan dan ramah lingkungan untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan. Selain itu, proses manufaktur insulasi termal juga dapat diturunkan agar biaya produksi lebih rendah dan dapat dijangkau oleh semua lapisan masyarakat. Salah satu solusi yang dapat ditawarkan dalam menyelesaikan permasalahan tersebut adalah dengan memanfaatkan serat alam dan limbah polimer yang sudah tidak lagi digunakan untuk dijadikan komposit.

Menurut *Indonesia National Carbon Accounting System* tahun 2020, Indonesia memiliki 23% spesies tumbuhan dan menempati urutan ketujuh di dunia dengan jumlah spesies tanaman tertinggi mencapai 20.000 spesies. Kalimantan, khususnya Provinsi Kalimantan Timur, memiliki luas hutan sebesar 13 Ha memiliki potensi kekayaan hayati yang melimpah menjadikan hasil perkebunan menjadi komoditi utama yang dapat dikelola, seperti kelapa, pisang, karet, dan lainnya. Pisang menjadi tumbuhan yang sering dijumpai di Kalimantan. Data yang diambil dari Kementerian Pertanian Republik Indonesia tahun 2019 mencatat bahwa total produksi/hektar dari pisang di Provinsi Kalimantan Timur sebanyak 103.888 ton. Selain ketersediaannya yang melimpah, batang pisang juga memiliki struktur berpori yang dapat dimanfaatkan sebagai penghambat perpindahan panas. Batang pisang selalu dipotong dan menjadi limbah biomassa setelah pisang dipanen. Sehingga, batang pisang ini sudah tidak lagi digunakan. Menurut penelitian (Manohar, 2016) batang pisang memiliki nilai konduktivitas termal sebesar 0,04415 W/mK. Hal ini yang melatarbelakangi batang pisang dapat dijadikan material insulasi panas (Muthukumar dkk., 2020).

Pemilihan matriks dalam pembuatan komposit juga menjadi bahan pertimbangan yang tidak kalah penting. Diantara semua jenis termoplastik, polipropilena (PP) memiliki nilai konduktivitas termal yang paling rendah, yaitu 0,11–0,17 W/mK. Selain itu, jumlah produksi polipropilena di Indonesia mencapai 38.000 ton/tahun pada tahun 2020 (OKTIOLA & FAUZIAH, 2021). Dengan tingginya produksi polipropilena, diprediksikan akan menghasilkan limbah yang dapat merugikan lingkungan bila tidak dilakukan langkah penanganan yang tepat. Untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan, maka pada penelitian ini akan memanfaatkan limbah PP, yaitu tutup botol dari kemasan minuman yang kemudian disebut polipropilena daur ulang (PPDU) yang kemudian akan dibandingkan dengan PP.

Untuk menghasilkan insulasi dengan sifat termal yang baik, pembuatan komposit batang pisang dan polipropilena (BP/PP dan BP/PPDU) dipengaruhi oleh beberapa faktor terutama fraksi volume. Pujari dkk., (2018) melakukan penambahan fraksi volume fiber batang pisang pada matriks Epoksi sebesar 30, 40 dan 60%. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh nilai konduktivitas termalnya menurun seiring dengan penambahan fraksi volume, yaitu 0,243 W/mK, 0,230 W/mK dan 0,228 W/mK untuk masing-masing variabel. Selain itu, panjang fiber yang digunakan juga dapat mempengaruhi konduktivitas termal yang dihasilkan. Menurut penelitian Subramanya, dkk. (2022), penambahan serat batang pisang dengan panjang 5, 8, dan 10 mm dapat menghasilkan nilai konduktivitas termal sebesar 0,342 W/mK, 0,321 W/mK, dan 0,308 W/mK. Dengan demikian, penambahan fraksi volume dan panjang fiber batang pisang dapat menurunkan konduktivitas termal. Sehingga, kemampuan menghantarkan panas pada material komposit batang pisang dan polipropilena menjadi sulit, sehingga cocok dijadikan sebagai material insulasi panas.

Metode pembuatan komposit dengan jenis polimer termoplastik lebih kompleks dibandingkan dengan jenis termoset. Hal ini dikarenakan pelet polimer harus dilelehkan terlebih dahulu dan impregnasi ke celah-celah seratnya. Namun, metode *compression molding* menambahkan tekanan pada saat proses pemanasan yang memudahkan proses impregnasi polimer. Keuntungan lain menggunakan metode *compression molding* adalah serat penguat yang tidak bergeser pada saat proses manufaktur. Selain itu, persentase serat penguat dapat disesuaikan atau ditambahkan hingga 60% untuk menghasilkan nilai yang akurat (Annie Paul dkk., 2008).

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibuat komposit berbahan dasar polipropilena dan batang pisang dengan menggunakan metode *compression molding*. Penelitian ini akan difokuskan pada analisis pengaruh fraksi volume batang pisang terhadap karakteristik termal.

2. Metode

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah batang pisang dan polipropilena. Jenis pisang yang digunakan adalah jenis Pisang Kepok (*Musa acuminata* × *balbisiana*). Batang pisang yang diambil memiliki umur di atas 1 tahun atau setelah pisang dipanen. Polipropilena murni komersial dibeli dan digunakan tanpa perlakuan tambahan. Sedangkan, polipropilena bekas yang digunakan adalah tutup botol minuman bekas dengan merk yang sama.

Tabel 1. Sifat Material Penyusun Komposit.

Sifat Material	Batang Pisang	Polipropilena Murni (PP)	Polipropilena Daur Ulang (PPDU)
Densitas (gr/ml)	0,67-1,50 ^a	0,91 ^b	0,90 ^c
Temperatur Leleh (°C)	501 ^d	165 ^e	163 ^f
Konduktivitas Panas (W/mK)	0,1166 ^g	0,1 – 0,22 ^h	-

^a(Assis dkk., 2015), ^c(Cirplus, t.t.), ^{e,f}(Achilias dkk., 2008), ^{b,g}(Annie Paul dkk., 2008), ^h(Maier & Calafut, 1998; Wang dkk., 2020)

Serat batang pisang dipotong kecil dengan ukuran 10 mm × 2 mm. Serat batang pisang lalu dioven pada temperatur 90°C selama 60 menit untuk menghilangkan kadar airnya. Batang pisang diketahui memiliki kadar air dalam rentang 10-15%. Kandungan air ini dapat mempengaruhi nilai konduktivitas termal. Hal ini karena air mempunyai sifat konduktor yang mampu merambatkan panas dengan baik. Semakin banyak air di dinding sel akan mempermudah perambatan panas di dalam kayu. Menurut (Siau, 1995), konduktivitas panas dari kayu akan meningkat searah dengan kadar air yang meningkat, terutama bila dihitung berdasarkan fraksi volume dari dinding sel. Konduktivitas air jauh lebih tinggi dibandingkan dengan serat batang pisang yaitu 0,59 W/mK, sehingga semakin tinggi kadar air pada batang pisang maka semakin tinggi nilai konduktivitas termal yang dihasilkan (Adha & Mora, 2023). Pemanasan batang pisang dilakukan berulang hingga mendapatkan massa konstan yang mengindikasikan serat telah kering dan siap diproses ke tahapan selanjutnya.

Selanjutnya, pembuatan komposit serat batang pisang dan polipropilena dilakukan dengan menggunakan mesin *compression molding*. Mula-mula, cetakan logam dibuat dengan ukuran 200 × 200 × 10 mm³ (panjang × lebar × tebal). Serat batang pisang yang telah dipotong dicampur dengan polipropilena secara acak dan homogen dengan fraksi volume serat sebesar 0%, 10%, 30% dan 50%. Perancangan komposit dimulai dengan menggunakan persamaan (1). Persamaan (1) menghitung volume fiber (v_f) yang dibutuhkan untuk membuat volume sesuai ukuran cetakan atau komposit utuh (v_c). Setelah volume diketahui, massa serat yang dibutuhkan (w_f) dalam pembuatan spesimen dapat dihitung melalui persamaan (2). Perhitungan volume dan serat matriks juga dapat dihitung sesuai persamaan (3) dan (4). Dalam perhitungan tersebut, densitas yang digunakan menggunakan data pada Tabel 1, yaitu 0,69 gr/ml untuk batang pisang, 0,731 gr/ml untuk PP, dan 0,90 gr/ml untuk PPDU. Satuan yang digunakan untuk volume adalah mililiter (ml), massa adalah gram (gr), dan densitas adalah gram/mililiter (gr/ml). Sehingga, didapatkan perhitungan massa serat dan polimer yang digunakan dalam pembuatan sampel yang dapat dilihat pada Tabel 2. Kemudian, campuran tersebut ditekan dengan tekanan sebesar 8 MPa dan dipanaskan pada temperatur 170°C selama 60 menit. Persamaan 5 digunakan untuk menghitung densitas teori yang akan dijelaskan pada subab selanjutnya.

$$v_f = V_f \times \rho_f \quad (1)$$

$$w_f = v_f \times \rho_f \quad (2)$$

$$v_m = V_m \times \rho_m \quad (3)$$

$$w_m = v_m \times \rho_m \quad (4)$$

$$\rho_c = \rho_c V_f + \rho_m V_m \quad (5)$$

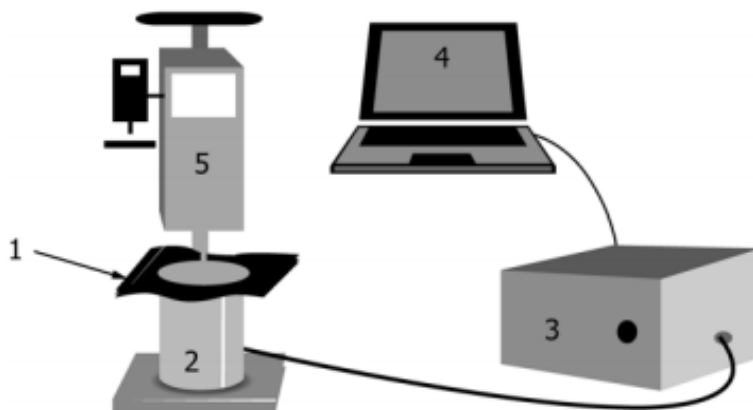
Tabel 2. Komposisi Massa Serat dan Matriks pada Spesimen BP/PP dan BP/PPDU.

Komposisi BP/PP					
Serat (BP)			Matriks (PP)		
Fraksi Volume	Volume (ml)	Massa (gr)	Fraksi Volume	Volume (ml)	Massa (gr)
0	0	0	100	400	292,40
0,1	40	27,60	0,9	360	263,16
0,3	120	82,80	0,7	280	204,68
0,5	200	138,00	0,5	200	146,20
Komposisi BP/PPDU					
Serat (BP)			Matriks (PPDU)		
Fraksi Volume	Volume (ml)	Massa (gr)	Fraksi Volume	Volume (ml)	Massa (gr)
0	0	0	100	400	292,40
0,1	40	27,60	0,9	360	263,16
0,3	120	82,80	0,7	280	204,68
0,5	200	138,00	0,5	200	146,20

Hasil manufaktur komposit kemudian diukur *bulk density*-nya. Pengukuran densitas dilakukan dengan persamaan (6) dimana massa yang diukur adalah massa yang tertimbang (m) dan volume (v) yang digunakan adalah volume spesimen. Diketahui bahwa spesimen memiliki ukuran dimensi 20 × 20 × 10 mm³. Selanjutnya, perhitungan *void* dilakukan dengan menghitung selisih antara densitas teori dan *bulk density*-nya yang kemudian dijelaskan pada subab selanjutnya.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Setelah itu, pengujian konduktivitas termal juga dilakukan dengan menggunakan *C-Therm TCi Thermal Conductivity Analyzer*. Pengujian ini menggunakan standar ASTM D7984 yang dapat dilihat pada Gambar 1. Secara garis besar, spesimen yang telah dipotong (1) diletakkan di atas pemanas sebagai sumber panas pada satu sisi permukaan yang menyebabkan temperatur permukaan spesimen naik 1–3°C dan sensor untuk mengukur temperatur permukaan spesimen dengan akurasi ±0,01°C (2). *Controller* (3) digunakan untuk mengatur masuknya panas pada pemanas agar temperatur pada permukaan dapat diatur. Spesimen ditekan dengan menggunakan *constant pressure applicator* (5) untuk menjaga kestabilan spesimen. Sinyal yang dihasilkan dari sensor kemudian diproses dan ditampilkan di dalam sebuah *device* (4). Nilai konduktivitas kemudian digunakan untuk menghitung tahanan termal (persamaan (7)) dan resistan termal (persamaan (8)).



Gambar 1. Ilustrasi Apparatus Pengujian Konduktivitas Termal (ASTM D7984 – 16, t.t.).

$$R = \frac{L}{Ak} \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (8)$$

3. Hasil dan Pembahasan

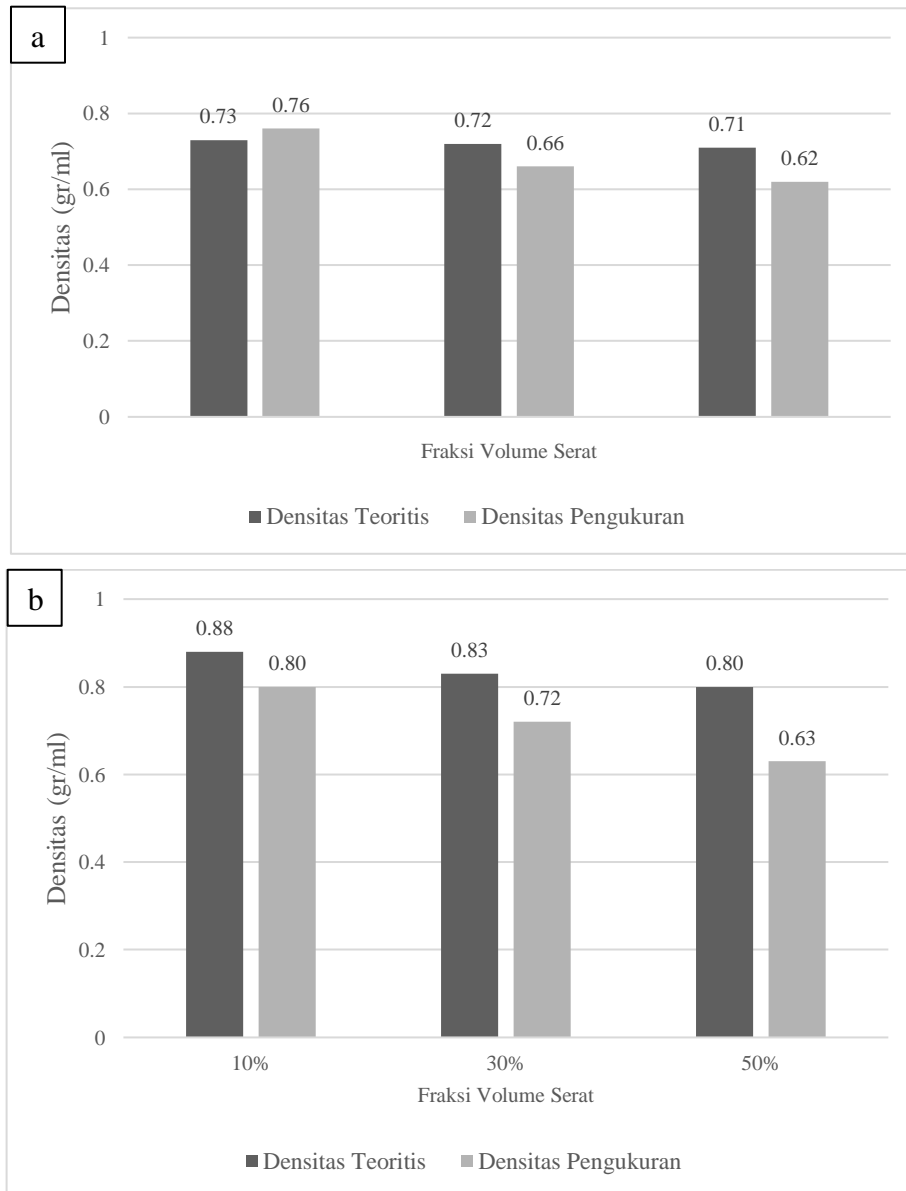
Pembuatan komposit berbahan dasar batang pisang dan polipropilena telah dilakukan. Pengukuran densitas dilakukan untuk membandingkan komposit desain dan hasil manufaktur. Perbandingan densitas teori yang dihitung melalui persamaan (5) dan pengukuran yang dihitung melalui persamaan (6) dapat dilihat pada Gambar 2 (a) untuk spesimen BP/PP dan (b) untuk spesimen BP/PPDU. Berdasarkan grafik tersebut, akurasi densitas paling tepat diperlihatkan pada fraksi volume 10% dari hasil manufaktur menggunakan *compression molding*. Lebih dari itu, densitas yang dihasilkan tidak sesuai dengan densitas teoritisnya. Selisih densitas antara densitas teoritis dan pengukuran dapat dilihat pada Tabel 3. Selisihnya meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi volume dan selisih lebih besar nilainya terjadi pada spesimen dengan PPDU. Ketidaksesuaian densitas ini terjadi akibat adanya *void* atau pori.

Pori terbentuk karena adanya udara yang terperangkap selama preparasi resin dan *moisture adsorption* ketika proses pengerjaan atau penyimpanan (Zulfikar dkk., 2023). Salah satu alasan yang menyebabkan cacat ini terbentuk dapat disebabkan oleh parameter proses yang berhubungan dengan tekanan kompresi. Lama penekanan pada proses pembuatan komposit mempengaruhi densitas dan jumlah pori yang dihasilkan. Menurut penelitian Setiajit dkk., (2016) nilai densitas komposit kenaf-PP naik sebesar 1,010-1,099 g/cm³ dengan waktu penekanan 5-25 menit. Waktu pengepresan yang semakin lama maka pori akan berkurang sehingga menghasilkan densitas yang tinggi. Selain waktu penekanan, besar tekanan yang digunakan pada *compression moulding*, juga menghasilkan komposit yang lebih padat. Dengan menggunakan tekanan yang berkisar 15-20 MPa dapat menghasilkan densitas sebesar 1,88-1.9 gr/ml (Hasanah & Muslimin, 2020). Tekanan ini berdampak pada proses impregnasi polimer ke dalam celah polimer juga meningkat. Hal ini karena kehadiran tekanan pada prinsipnya berfungsi sebagai gaya pendorong yang mempercepat laju penetrasi tersebut (Masturi dkk., 2012)

Gambar 2 juga menunjukkan bahwa densitas spesimen menurun seiring dengan meningkatnya fraksi volume serat baik menggunakan PP maupun PPDU. Hal ini dikarenakan densitas batang pisang lebih rendah daripada matriksnya. Sedangkan, spesimen dengan PPDU menghasilkan densitas yang lebih tinggi dikarenakan densitas PPDU lebih tinggi daripada PP. Hal ini sesuai dengan penelitian Irnawan dkk., (2022) yang menyebutkan bahwa dengan penambahan fraksi volume serat akan menurunkan densitasnya.

Spesimen dengan PPDU cenderung memiliki pori yang lebih tinggi daripada polipropilena murni seiring dengan meningkatnya fraksi volume serat. Menurut literatur, polipropilena yang telah melalui proses daur ulang memiliki berat molekul dan polidispersitas yang lebih rendah daripada yang murni. Hal ini dikarenakan adanya radikal bebas yang memotong rantai molekul. Degradasi pada polipropilena mengubah entalpi polipropilena murni (78,5 J/g) menjadi 83,7 J/g (Hernández-Sánchez & Herrera-Franco, 2001). Sehingga, untuk melelehkan PPDU membutuhkan energi yang lebih tinggi. Namun, pembuatan komposit BP/PPDU pada penelitian ini menggunakan temperatur proses yang sama dengan polipropilena murni. Alhasil proses impregnasi polimer menjadi kurang sempurna. Alasan ini yang memungkinkan pembentukan *void* pada komposit polipropilena daur ulang lebih besar.

Selain itu, meningkatnya jumlah pori juga dipengaruhi oleh fraksi volume serat yang ditambahkan. Pori-pori dalam struktur batang pisang juga ikut berkontribusi dalam pembentukan *void* secara keseluruhan. Pori-pori pada batang pisang berkisar antara 5 – 20 μm (Subagyo & Chafidz, 2018).



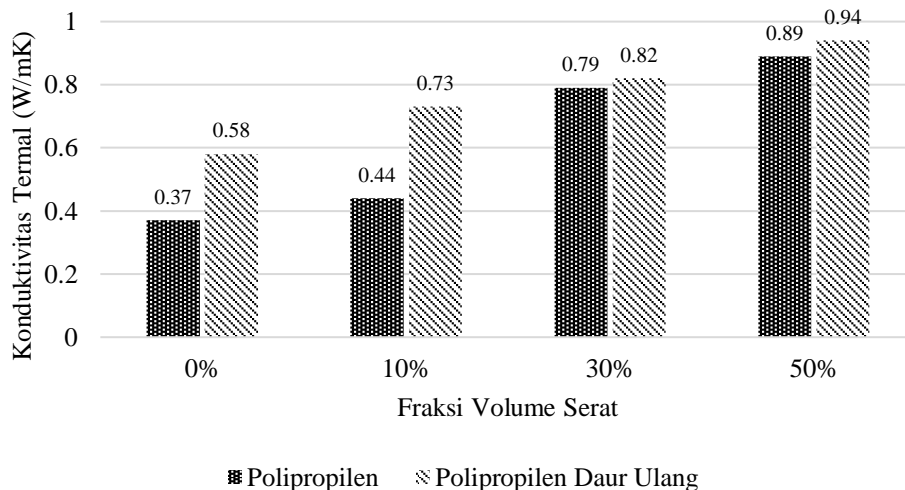
Gambar 2. Perbandingan Nilai Densitas Komposit dari (a) BP/PP dan (b) BP/PPDU.

Tabel 3. Data *Void* pada Spesimen BP/PP dan BP/PPDU.

Jenis Spesimen	<i>Void</i> (%)		
	10%	30%	50%
BP/PP	~	8.33	12.68
BP/PPDU	9	13.25	21.25

Namun demikian, cacat pori yang terbentuk ini dapat dimanfaatkan menjadi penghambat perambatan panas yang kemudian berpengaruh pada konduktivitas panas. Pori yang terdiri dari udara merupakan isolator panas yang baik

dengan nilai konduktivitas termal sebesar 0,026 W/mK (Mirmanto dkk., 2021). Beberapa produk komersial juga didesain memiliki pori untuk menghambat perpindahan panas. Namun, hasil penelitian kami tidak sesuai dengan teori yang ada. Semakin tinggi pori pada komposit, semakin tinggi juga nilai konduktivitas termalnya berdasarkan Gambar 3, yaitu dari 0,37 hingga 0,89 W/mK untuk BP/PP dan 0,58 hingga 0,94 W/mK untuk BP/PPDU. Padahal untuk aplikasi insulasi panas, dibutuhkan konduktivitas panas yang rendah.



Gambar 3. Nilai Konduktivitas Termal pada Komposit dari Batang Pisang/Polipropilena dan Batang Pisang/Polipropilena Daur Ulang.

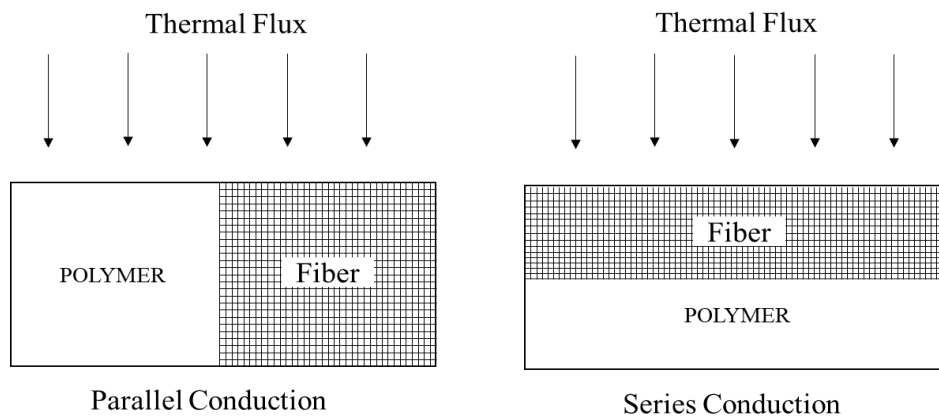
Hal ini juga tidak sesuai dengan beberapa penelitian terdahulu yang mengombinasikan bahan alam dengan polimer (Tabel 4). Bahan alam yang digunakan adalah serat batang pisang (Pujari dkk., 2017; Subramanya dkk., 2022), serat rami (Nath dkk., 2019), serbuk kayu ulin (Bustomi & Ghofur, 2021), dan serat daun nanas (P dkk., 2023). Berdasarkan penelitian terdahulu, nilai konduktivitas termal komposit semakin menurun seiring dengan penambahan fraksi volume serat. Hal ini diakibatkan oleh tingginya kandungan selulosa pada serat alam yang buruk dalam menghantarkan panas atau dengan kata lain serat alam memiliki nilai konduktivitas yang rendah (Nath dkk., 2019; Subramanya dkk., 2022). Selain itu, berdasarkan penelitian P dkk. (2023), nilai konduktivitas termal menurun diakibatkan oleh pori pada serat alam yang digunakan. Pori alami yang dimiliki oleh serat akan menghambat transmisi panas sehingga menurunkan nilai konduktivitas termal baik menggunakan polimer termoset maupun termoplast walaupun polimer termoplastik menghasilkan nilai konduktivitas panas yang lebih rendah (Bustomi & Ghofur, 2021).

Tabel 4. Perbandingan Nilai Konduktivitas Insulasi Panas Berbasis Serat Alam.

Material	Variasi	Konduktivitas Termal (W/mK)	Penulis
Serat Batang Pisang – Epoksi	Fraksi volume fiber :		(Pujari dkk., 2017)
	30%	0,243	
	40%	0,230	
Serat Rami – Epoksi	Fraksi volume fiber :		(Nath dkk., 2019)
	15%	0,380	
	25%	0,370	
	35%	0,360	
Serbuk Kayu Ulin – Poliester	Fraksi volume fiber:		(Bustomi & Ghofur, 2021)
	20%	0,049	
	25%	0,046	
Serat Batang Pisang – Epoksi	Panjang fiber :		(Subramanya dkk., 2022)
	5 mm	0,342	
	8 mm	0,321	
Serat Daun Nanas – Epoksi	Fraksi volume fiber:		(P dkk., 2023)
	10%	0,2526	
	15%	0,2453	

Beberapa alasan mengapa hasil penelitian ini tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya. Satu, hal ini dapat disebabkan oleh posisi serat batang pisang dan polipropilena dengan arah fluks termal. Menurut Annie Paul, dalam komposit polimer, jika posisi serat sejajar dengan arah fluks termal, konduktivitas termal akan tinggi (konduksi paralel) dan jika posisi serat tegak lurus terhadap arah fluks termal, konduktivitas termal akan menjadi rendah (konduksi seri) (Annie Paul dkk., 2008). Pada penelitian ini serat batang pisang dan polimer diletakkan secara acak dalam pencetakannya menjadi komposit. Oleh karena itu, fluks termal antara arah serat dan polimer menjadi tidak beraturan dan mengakibatkan nilai konduktivitas termal justru meningkat. Kondisi ini diilustrasikan pada Gambar 4.

Kedua, kandungan air yang terkandung di alam batang pisang tidak bisa hilang sempurna karena sifat serat yang secara alamiah bersifat hidrofilik walaupun telah dikeringkan dalam oven. Hal ini karena air mempunyai sifat konduktor yang mampu merambatkan panas dengan baik. Semakin banyak air di dinding sel akan mempermudah perambatan panas di dalam kayu. Namun, perlu adanya studi lebih lanjut untuk mengoptimalkan karakteristik termal pada pengembangan material insulasi termal, karena batang pisang telah memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah, yaitu 0,1166 W/mK (Annie Paul dkk., 2008).



Gambar 4. Arah Flux Termal pada Posisi Paralel dan Seri (Annie Paul dkk., 2008).

Selain itu, jika dibandingkan dengan polipropilena daur ulang, polipropilena murni memiliki kecenderungan menghambat panas yang baik dilihat dari nilai konduktivitasnya yang rendah di semua spesimen. Hal ini dikarenakan fluks panas pada polipropilena murni lebih rendah daripada yang didaur ulang (Hernández-Sánchez & Herrera-Franco, 2001).

Selain konduktivitas termal, sifat tahanan termal juga mempengaruhi performa material insulasi panas. Tahanan panas merupakan perbedaan temperatur per unit fluks panas yang digunakan untuk menjaga satu unit fluks panas tetap berada di antara permukaan yang panas dan lebih dingin dalam kondisi tunak atau biasa disebut R-value. Sedangkan, U-value atau koefisien perpindahan panas secara keseluruhan dapat dihitung melalui inversi R-value ($1/R$). Kedua nilai ini penting dalam membandingkan produk insulasi termal di pasaran. Semakin tinggi R-value atau semakin rendah U-value, maka semakin baik kemampuan insulasi termalnya.

Tabel 5. Perbandingan Sifat Tahanan Termal dan Resistan Termal pada Material Komposit Batang Pisang/Polipropilena dan Produk Komersial.

Material Insulasi	Tahanan Termal, K/W (R-Value)	Transmitansi Termal, W/K (U-Value)
PP Murni-BP 0%	0,68	1,47
PP Murni-BP 10%	0,57	1,76
PP Murni-BP 30%	0,32	3,16
PP Murni-BP 50%	0,28	3,57
PP Daur Ulang-BP 0%	0,43	2,32
PP Daur Ulang-BP 10%	0,34	2,92
PP Daur Ulang-BP 30%	0,30	3,28
PP Daur Ulang-BP 50%	0,27	3,76
Expanded Polystyrene (EPS)*	1,32	0,76
Polyurethane (PU)*	2,36	0,42
Polyisocyanurate (PIR)	2,42	0,38
Rockwool*	1,30	0,72

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan R-value (persamaan (7)) dan U-value (persamaan (8)) pada komposit batang pisang dan polipropilena baik murni maupun daur ulang dengan memasukkan nilai konduktivitas yang telah diukur sebelumnya. Selain itu, kami juga membandingkan nilainya dengan produk komersial. Berdasarkan Tabel 5,

sifat tahanan termal yang dimiliki oleh material komposit berbahan dasar serta batang dan polipropilena masih rendah jika dibandingkan dengan produk komersial saat ini, begitu juga dengan resistansi termalnya.

Kesimpulan

Pembuatan komposit polipropilena dan batang pisang untuk aplikasi insulasi suara telah dilakukan. Semakin kecil fraksi volume serat batang pisang yang ditambahkan secara garis besar menghasilkan konduktivitas panas yang lebih rendah, begitu pula yang terjadi pada pemakaian limbah polipropilena. Jika dibandingkan dengan limbah polipropilena, penggunaan polipropilena murni lebih disukai karena konduktivitasnya lebih rendah. Walaupun komposit polipropilena dan batang pisang belum memenuhi standar, tetapi upaya untuk mengembangkan komposit ini masih memungkinkan karena pada dasarnya batang pisang memiliki konduktivitas rendah menurut penelitian sebelumnya. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah menyusun serat dan polimer tegak lurus dengan arah fluks. Dengan begitu, diharapkan pengembangan insulasi termal berbahan baku serat alam, terutama batang pisang, bisa berkembang dengan baik.

Daftar Notasi

ρ	=	Densitas [gr/ml]
w	=	Massa [gr]
c	=	Komposit
f	=	Fiber
m	=	Polimer
V_f	=	Fraksi Volume
ρ_f	=	Densitas serat secara teoritis [gr/ml]
V_m	=	Fraksi volume matriks
ρ_m	=	Densitas matriks secara teoritis [gr/ml]
v_f	=	Volume fiber
v_c	=	Volume komposit utuh
R	=	Tahanan termal [$W/m^2.K$]
L	=	Tebal/lintasan kalor [m]
A	=	Luas permukaan [m^2]
k	=	konduktivitas termal [$W/m.K$]
U	=	resistan termal [$m^2.K/W$]
V	=	Volume [ml]

Daftar Pustaka

- Achilias, D., Antonakou, E., Roupakias, C., Megalokonomos, G. P., & Lappas, A. (2008). RECYCLING TECHNIQUES OF POLYOLEFINS FROM PLASTIC WASTES. *Global NEST Journal*, 10(1), 114–122.
- Adha, D. K. Z. A., & Mora, M. (2023). Sifat Fisis dan Mekanis Papan Partikel Serbuk Batang Pisang dan Kulit Buah Kakao Bertulang Ayam Lidi Kelapa. *Jurnal Fisika Unand*, 12(2), 291–297. <https://doi.org/10.25077/JFU.12.2.290-296.2023>
- Annie Paul, S., Boudenne, A., Ibos, L., Candau, Y., Joseph, K., & Thomas, S. (2008). Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), 1582–1588. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.06.004>
- Assis, F. S., Margem, F. M., Cordeiro, T. C., Figueiredo, A. B. H., Braga, F. O., & Monteiro, S. N. (2015). Photoacoustic Thermal Characterization of Banana Fibers. *Materials Research*, 18, 240–245. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.368914>
- ASTM D7984 – 16. (t.t.). *Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument 1*. <https://doi.org/10.1520/D7984-16>
- Berber, N. (2020). INDUSTRIAL TRIAL to PRODUCE of ENVIRONMENTALLY FRIENDLY INSULATION MATERIAL with INORGANIC RESIN. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29(1).
- Bustomi, F., & Ghofur, A. (2021). Uji Konduktivitas Termal Komposit Poliester Filler Serbuk Kayu Ulin (Eusideroxylon Zwageri). *JTAM ROTARY*, 3(2), 233–244. https://doi.org/10.20527/JTAM_ROTARY.V3I2.4367
- Cirplus. (t.t.). *Procure Recycled PP via Cirplus Online Platform | CIRPLUS.COM*. Diambil 29 April 2024, dari <https://www.cirplus.com/materials/R-PP>
- Hasanah, U., & Muslimin, M. (2020). Pengaruh Tekanan Compression Moulding terhadap Kinerja Pelat Bipolar Komposit Grafit/Resin Epoksi Komposisi 20% Karbon Tempurung Kelapa. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(1), 71–80. <https://doi.org/10.32722/jmt.v1i1.3335>

- Hernández-Sánchez, F., & Herrera-Franco, P. J. (2001). Electrical and thermal properties of recycled polypropylene-carbon black composites. *Polymer Bulletin*, 45(6). <https://doi.org/10.1007/s002890170105>
- Irnawan, D., Hendarti, L., & Primantari, L. (2022). Kajian Pemanfaatan Limbah Jerami yang Berpotensi sebagai Wet Covering Beton. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, 19(2), 136–144. <https://doi.org/10.30630/JIRS.V19I2.886>
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). Polypropylene Chemistry. Dalam *Polypropylene The Definitive User's Guide and Databook* (First ed.). William Andrew. <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781884207587/polypropylene>
- Manohar, K. (2016). A Comparison of Banana Fiber Insulation with Biodegradable Fibrous Thermal Insulation. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 5, 249–255. www.ajer.org
- Masturi, M., Mikrajuddin, M., & Khairurrijal, K. (2012). Efektivitas Polyvinyl Acetate (PVAc) Sebagai Matriks Pada Komposit Sampah. *BERKALA FISIKA*, 13(2), 61–66. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MINJS>
- Mirmanto, M., Sugiman, S., Ramadhani, M. D., & Fathurrahman, F. (2021). Variasi persen berat tempurung kelapa terhadap konduktivitas termal komposit silicone rubber. *Dinamika Teknik Mesin*, 11(2), 107–115. <https://doi.org/10.29303/dtm.v11i2.450>
- Muthukumar, K., Sabariraj, R. V., Dinesh Kumar, S., & Sathish, T. (2020). Investigation of thermal conductivity and thermal resistance analysis on different combination of natural fiber composites of Banana, Pineapple and Jute. *Materials Today: Proceedings*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.140>
- Nath, S., Jena, H., Priyanka, & Sahini, D. (2019). Analysis of Mechanical Properties of Jute Epoxy Composite with Cenosphere Filler. *Silicon*, 11(2), 659–671. <https://doi.org/10.1007/S12633-018-9941-X/METRICS>
- OKTIOLA, A. T. S., & FAUZIAH, Q. (2021). *Pra Rancangan Pabrik Propilen Glikol Dari Propilen Oksida Dan Air Dengan Kapasitas 40.000 Ton/Tahun*. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/37177>
- P, N., C Subramanian, S., & K R, R. (2023). Pineapple Fiber Reinforced Epoxy Composite for Thermal Insulation Application. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4507269>
- Pavel, C., & Blagoeva, D. (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings – Revised edition*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2760/750646>
- Pratama, R. (2019). Efek Rumah Kaca Terhadap Bumi. *Buletin Utama Teknik*, 14(2).
- Pujari, S., Venkatesh, T., & Seeli, H. (2017). Experimental investigations on thermal conductivity of fenugreek and banana composites. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 99(1), 51–55. <https://doi.org/10.1007/S40033-017-0146-Z/METRICS>
- Rosmayanti, D. (2019). Analisis Performansi Air Conditioning 1 PK Dengan 3 Fluida Kerja. *Teknobiz: Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin*, 9(3).
- Setiajit, S. B., Sukanto, H., & Raharjo, W. W. (2016). Pengaruh waktu pengepresan terhadap sifat mekanik komposit kenaf / polypropylene. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 11(2), 89–93. <https://doi.org/10.36289/JTMI.V11I2.60>
- Siau, J. F. (1995). Wood : Influence of Moisture on Physical Properties. *Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University*, 143–188. <https://search.worldcat.org/title/807261164>
- Subagyo, A., & Chafidz, A. (2018). Banana Pseudo-Stem Fiber: Preparation, Characteristics, and Applications. *Banana Nutrition - Function and Processing Kinetics*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.82204>
- Subramanya, R., Sathyanarayana, P., Kn, M., & Naik, S. (2022). The manufacture and characterisation of short banana fibre-reinforced polymer composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1), 797–807. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1833403>
- Wang, W., Zeng, Y., Wang, W., & Zeng, Y. (2020). Polypropylene - Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties. *Polypropylene - Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.73995>
- Yunianto, B. (2020). Uji Prestasi Pemanas Air Tenaga Matahari Jenis Tabung dengan Variasi Arah Kolektor Terhadap Datangnya Sinar Matahari. *Rotasi : Jurnal Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 22(2).
- Zulfikar, M., Setiawan, F., & Wicaksono, D. (2023). PERBANDINGAN METODE VACUUM INFUSION & VACUUM BAGGING PADA KOMPOSIT BERPENGUAT FIBER KARBON KEVLAR. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 9(1). <https://doi.org/10.56521/teknika.v9i1.860>

Pembangunan Model Pendeteksi Risiko Preeklamsia pada Ibu Hamil dengan Menggunakan Metode *Data Mining*

Muhammad Ilham¹, Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani¹, dan Kadarsah Suryadi¹

¹Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

mohammad.ilham362@gmail.com, saddhwi@itb.ac.id, kadarsah@itb.ac.id

Abstrak

Preeklamsia adalah komplikasi kehamilan yang diindikasikan dengan peningkatan tekanan darah yang terjadi setelah usia kehamilan 20 minggu serta keberadaan protein di dalam urine. Apabila tidak ditangani dengan cepat, preeklamsia dapat berujung pada kematian ibu dan janin. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang dapat membantu para tenaga kesehatan untuk dapat memberikan deteksi awal penyakit preeklamsia yang diderita oleh ibu hamil. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode *data mining*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan model berdasarkan metode *data mining* yang dapat digunakan sebagai alat untuk mengidentifikasi pasien dengan preeklamsia dan juga untuk mengidentifikasi faktor risiko terkait. Penelitian dilakukan dengan menggunakan enam algoritma klasifikasi *data mining* pada 109 data pasien klinik kandungan di Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi (RSIJPK). Fitur *input* yang digunakan sebagai atribut deteksi Preeklamsia diperoleh berdasarkan hasil studi literatur dan hasil konsultasi dengan dokter spesialis kandungan. Berdasarkan hasil evaluasi model, diperoleh *logistic regression* sebagai algoritma yang memiliki performansi terbaik dalam mendeteksi penyakit preeklamsia pada pasien kehamilan RSIJPK dengan nilai akurasi sebesar 98% dan tingkat presisi sebesar 100%. Selain itu, pada penelitian ini juga dirancang suatu prototipe aplikasi yang dapat digunakan oleh tenaga kesehatan untuk dapat mendeteksi risiko preeklamsia pada ibu hamil secara cepat.

Kata kunci: *data mining*, *logistic regression*, preeklamsia

Abstract

Preeclampsia is a pregnancy complication indicated by an increase in blood pressure that occurs after 20 weeks of gestation and the presence of protein in the urine. If not treated quickly, preeclampsia can lead to maternal and fetal death. Therefore, a method that can help health workers to provide early detection of preeclampsia is needed. One method that can be used is data mining. This study was conducted with the aim of developing a model based on data mining methods that can be used as a tool to identify patients with preeclampsia and also to identify associated risk factors. This study was conducted using six data mining classification algorithms on 109 obstetric clinic patient data at the Jakarta Pondok Kopi Islamic Hospital (RSIJPK). The input features used as preeclampsia detection attributes were obtained based on the results of a literature study and consultations with obstetricians. Based on the results of the model evaluation, logistic regression has the best performance in detecting preeclampsia with accuracy value of 98% and precision level of 100%. In addition, this study also designed an application prototype that can be used by health workers to quickly detect the risk of preeclampsia in pregnant women.

Keywords: data mining, logistic regression, preeclampsia

1. Pendahuluan

Pada tahun 2020, angka kematian ibu akibat kehamilan cukup tinggi yaitu sekitar 287.000 ibu meninggal di seluruh dunia pada saat atau sesudah masa kehamilan (World Health Organization, 2023) Angka kematian ibu di Indonesia merupakan salah satu yang paling tinggi di Asia Tenggara (Baharuddin dkk., 2019). Terdapat beberapa komplikasi utama yang mengakibatkan kematian ibu akibat kehamilan, diantaranya yaitu pendarahan setelah melahirkan, infeksi setelah melahirkan, serta preeklamsia dan eklamsia (World Health Organization, 2023). Berdasarkan data kematian ibu pada bulan September sampai Oktober pada tahun 2014 di rumah sakit yang tersebar di provinsi Sumatera Utara, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Sulawesi Selatan, ditemukan bahwa preeklamsia adalah penyebab kematian ibu dengan angka tertinggi yaitu sebanyak 38 kasus dari total 90 kasus atau sebesar 42% dari sampel (Baharuddin dkk., 2019).

Preeklamsia adalah komplikasi kehamilan yang diindikasikan dengan peningkatan tekanan darah yang terjadi setelah usia kehamilan 20 minggu serta keberadaan protein di dalam urin (Roberts & Gammill, 2005). Kelainan ini memberikan dampak kepada ibu dan juga anak yang berada di dalam janin. Kelanjutan dari preeklamsia adalah eklamsia yang ditandai dengan kejang-kejang yang diderita oleh pasien. Apabila tidak ditangani dengan cepat, preeklamsia dapat berujung pada kematian ibu dan janin. Terdapat dugaan bahwa preeklamsia disebabkan oleh kelainan dari fungsi dan perkembangan plasenta, yaitu organ yang memiliki fungsi untuk menyalurkan nutrisi dan darah untuk janin.

Info Makalah:

Dikirim : 07-13-23;
Revisi 1 : 02-16-24;
Diterima : 02-20-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-817110695
e-mail : saddhwi@itb.ac.id

Kematian ibu yang disebabkan oleh preeklamsia dapat dicegah sejak dini (Kustiyahningsih dkk., 2020). Deteksi dini preeklamsia sangat penting dan disarankan untuk dilakukan selama trimester pertama kehamilan agar tindakan pencegahan dapat dimulai lebih awal (Chaemsaitong dkk., 2022). Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang dapat membantu para tenaga kesehatan untuk dapat memberikan deteksi awal terkait penyakit preeklamsia yang diderita oleh ibu hamil. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendeteksi Preeklamsia adalah metode *data mining*. *Data mining* merupakan suatu tahapan yang dilakukan pada pencarian pengetahuan dari *database* untuk memproduksi pola atau model yang berguna dari data (Silwattananusarn & KulthidaTuamsuk, 2012). *Data mining* terletak di antara ilmu statistik, teknologi basis data, pengenalan pola, pembelajaran mesin, visualisasi data, dan sistem pakar (Obenshain, 2004). Berdasarkan data-data *health record* yang telah dikumpulkan oleh pihak rumah sakit, dapat dibangun model deteksi dengan berbagai metode *data mining* untuk memilih model terbaik berdasarkan beberapa parameter evaluasi model. Penggunaan metode *data mining* untuk mendeteksi Preeklamsia pada pasien diharapkan dapat membantu tenaga kesehatan untuk mempercepat pendeteksian preeklamsia pada pasien untuk menekan angka kematian ibu.

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan penerapan metode *data mining* untuk mendeteksi penyakit preeklamsia pada pasien kehamilan. Poon dan Nicolaides (2014) mengembangkan metode skrining yang efektif untuk memprediksi Preeklamsia pada trimester pertama kehamilan dengan menggunakan *Bayes Theorem*. Zhang dkk. (2019) melakukan penelitian untuk mengestimasi kinerja prediktif dari model skrining untuk preeklamsia pada pasien hamil trimester pertama di Cina berdasarkan karakteristik ibu, MAP, serum PLGF, dan PAPP-A dengan menerapkan algoritma PREDICTOR. Sufriyana dkk. (2020) mengembangkan dan memvalidasi model prediksi Preeklamsia dengan menggunakan algoritma *Random Forest* yang diterapkan pada dataset asuransi kesehatan nasional di Indonesia. Marić dkk. (2020) mengembangkan model prediksi Preeklamsia dengan menggunakan algoritma *Elastic Net*, *Gradient Boosting*, dan *Logistic Regression*.

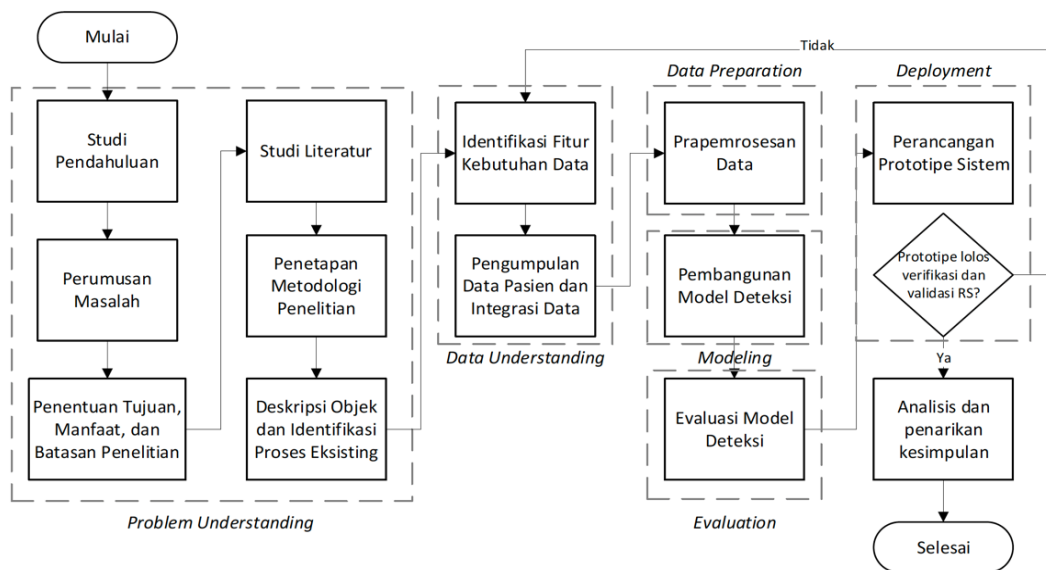
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan model berdasarkan metode *data mining* yang dapat digunakan sebagai alat pendeteksi untuk mengidentifikasi pasien dengan preeklamsia dan juga untuk mengidentifikasi faktor risiko yang memiliki kontribusi terbesar terhadap penyakit preeklamsia pada ibu hamil. Pada penelitian ini, akan dipilih algoritma terbaik untuk membangun model prediksi risiko preeklamsia tersebut. Algoritma yang akan dibandingkan dalam penelitian ini yaitu *decision tree*, *support vector machine*, *naïve bayes*, *logistic regression*, *k-nearest neighbors*, dan *random forest*. Penggunaan algoritma-algoritma *machine learning* ini disebabkan oleh jenis *task* yang akan diselesaikan pada penelitian ini. Fitur target dari penelitian ini adalah fitur risiko Preeklamsia yang direpresentasikan oleh dua nilai yaitu positif dan negatif. *Task* dari *data mining* yang digunakan untuk melakukan deteksi tersebut adalah *task* klasifikasi. Oleh karena itu, dipilih algoritma-algoritma yang dapat digunakan untuk melakukan *task* klasifikasi. Selain itu, pada penelitian ini juga akan dirancang suatu prototipe aplikasi yang dapat digunakan oleh tenaga kesehatan untuk dapat mendeteksi risiko preeklamsia pada ibu hamil secara cepat.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Langkah-langkah tersebut mengadopsi metodologi *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) untuk domain kedokteran yang disebut CRISP-MED-DM (Niakšu, 2015). Terdapat enam tahap pada metodologi CRISP-MED-DM, yaitu tahap *problem understanding*, *data understanding*, *data preparation*, *modeling*, *evaluation*, dan *deployment* (Niakšu, 2015).

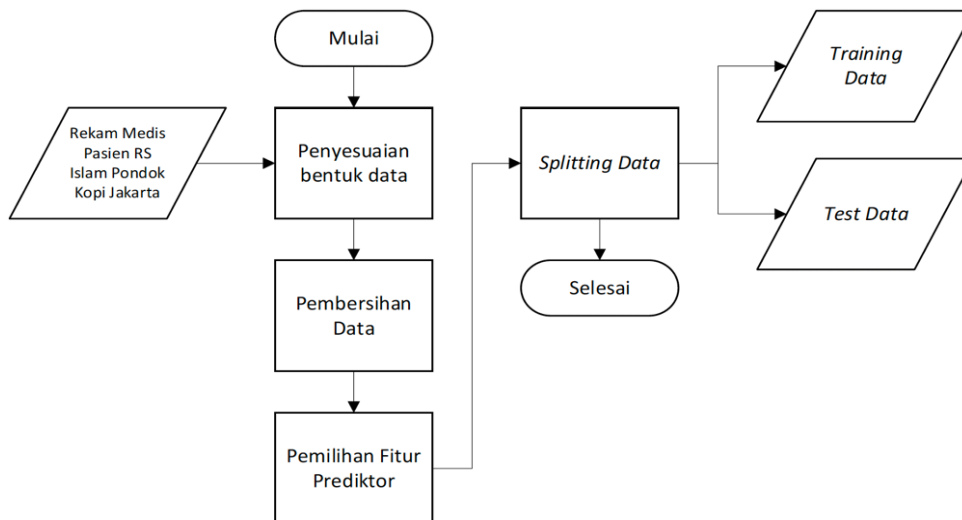
Tahap *problem understanding* merupakan tahapan awal yang dilakukan pada penelitian ini. Tahap ini terdiri dari studi pendahuluan, perumusan masalah, penentuan tujuan, manfaat, dan batasan penelitian, studi literatur, serta penetapan metodologi penelitian, serta deskripsi objek penelitian dan identifikasi proses eksisting.

Selanjutnya, *data understanding* merupakan tahapan yang terdiri dari identifikasi kebutuhan fitur data serta pengumpulan data pasien dan integrasi data. Data yang dibutuhkan untuk kebutuhan penelitian diidentifikasi berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan dan hasil wawancara dengan dokter spesialis kehamilan rumah sakit Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi (RSIJPK). Identifikasi fitur kebutuhan data dilakukan untuk melakukan seleksi terhadap seluruh data yang didapatkan dari pihak rumah sakit menjadi beberapa bagian data yang relevan dengan kebutuhan penelitian. Seleksi data tersebut dilakukan berdasarkan studi literatur dan hasil wawancara dengan dokter kandungan pihak rumah sakit. Pengurangan jumlah atribut dilakukan untuk mengurangi kompleksitas dari proses *data mining* serta untuk meningkatkan performa dari model yang akan dibangun. Pengumpulan data pasien dilakukan setelah identifikasi fitur kebutuhan data. Data dikumpulkan dari data pasien yang memiliki penyakit preeklamsia dan data pasien yang tidak memiliki penyakit preeklamsia. Data pasien diambil dalam horizon waktu tertentu dari bagian rekam medis dan laboratorium untuk pasien ibu hamil. Pengumpulan data yang dilakukan bersesuaian dengan standar prosedur yang akan diberikan oleh pihak rumah sakit. Data yang dikumpulkan dari bentuk berkas fisik milik rumah sakit dipindahkan ke dalam format *excel* untuk memudahkan kegiatan komputasi.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Tahap *data preparation* dilakukan dengan melakukan pra pemrosesan data. Pra Pemrosesan data dilakukan setelah dilakukan pengumpulan data pasien. Tahapan ini dilakukan agar data yang telah dikumpulkan siap untuk diolah dan memiliki format yang sesuai dengan kebutuhan pembangunan model deteksi. Tahapan pra pemrosesan data secara lebih detail ditampilkan pada Gambar 2. Tahapan dimulai dengan penyesuaian bentuk data, identifikasi kebutuhan atribut, pembersihan data, sampai *splitting data* menjadi 2 bagian yaitu data *training* dan data *test*.



Gambar 2. Tahap Pra Pemrosesan Data.

Kemudian, pada tahap *modeling* dilakukan pembangunan model deteksi preeklamsia. Data yang sudah siap akan diproses dengan menggunakan algoritma-algoritma yang telah ditentukan agar model yang dibangun dapat digunakan untuk mendeteksi risiko penyakit preeklamsia pada ibu hamil. Proses *data mining* dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python 3. Algoritma *machine learning* yang akan digunakan yaitu *decision tree*, *support vector machine*, *naïve bayes*, *logistic regression*, *k-nearest neighbors*, dan *random forest*. Setelah model dibangun dengan berbagai algoritma yang berbeda, akan dilakukan evaluasi sebagaimana dijelaskan pada tahapan selanjutnya. Kemudian, algoritma yang memiliki performansi terbaik pada tahapan evaluasi model akan ditingkatkan performannya dengan cara mencari kombinasi dari parameter-parameter yang digunakan pada model, atau yang biasa disebut dengan *hyperparameter tuning*. Percobaan kombinasi dari parameter-parameter tersebut sehingga didapatkan nilai yang optimal dapat dilakukan dengan menggunakan metode *grid search* maupun *random search* dan melakukan estimasi dari nilai *error* pada tahapan *training* model dengan menggunakan metode *cross validation*. Jumlah *fold* yang paling umum digunakan pada metode *cross validation* adalah 5 dan 10. Sufriyana dkk. (2020) menggunakan *10-fold cross validation*, sedangkan Marić dkk. (2020) menggunakan *5-fold cross validation*. Pada penelitian yang dilakukan, akan

digunakan *10-fold cross validation*. Namun, perlu diingat bahwa tidak seluruh kegiatan *hyperparameter tuning* dapat memberikan performa yang lebih baik apabila dibandingkan dengan proses konstruksi model yang tidak menggunakan *hyperparameter tuning* (Nair, 2021). Apabila hal tersebut terjadi, pembangunan model yang tidak menggunakan *hyperparameter tuning* dapat terpilih karena memiliki performa yang lebih baik.

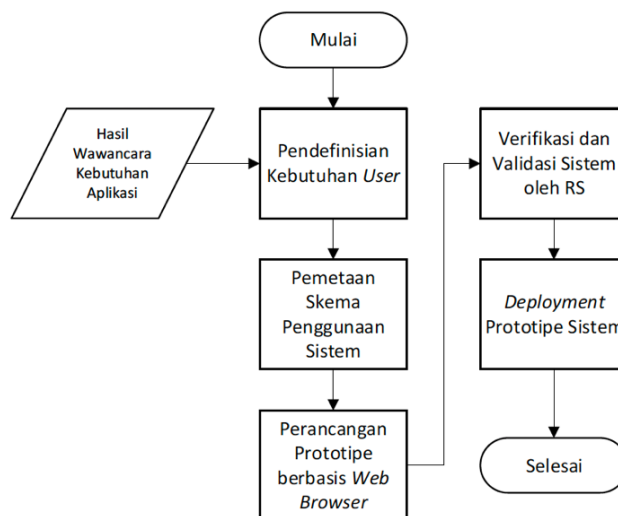
Tahap evaluasi model merupakan tahapan yang dilakukan untuk menguji hasil kinerja model klasifikasi penelitian. Model deteksi yang telah dibangun pada tahapan pembangunan model akan dilakukan evaluasi dengan menggunakan *confusion matrix* yang ditunjukkan pada Gambar 3 (Draelos, 2019). Perhitungan-perhitungan yang dilakukan pada TP, FP, FN, dan TN dapat menghasilkan beberapa parameter-parameter yang dapat digunakan untuk mengukur performansi dari model klasifikasi yang dibangun. *Metric* utama yang dijadikan acuan untuk mengevaluasi model adalah akurasi dan *precision*. Alasan digunakan *precision* adalah karena model tidak ingin salah mendeteksi pasien yang sebenarnya memiliki risiko tinggi untuk mengidap preeklamsia namun dideteksi tidak memiliki risiko tinggi untuk mengidap preeklamsia oleh model. Hal tersebut dapat berakibat fatal dan bahkan dapat memakan korban manusia. Setelah algoritma model deteksi dengan tingkat akurasi dan presisi tertinggi terpilih, model tersebut ditingkatkan performanya dengan menggunakan teknik *hyperparameter tuning* sebagaimana dijelaskan pada tahapan pembangunan model.

	<i>Actually Positive</i>	<i>Actually Negative</i>
<i>Predicted Positive</i>	<i>True Positives (TP)</i>	<i>False Positives (FP)</i>
<i>Predicted Negative</i>	<i>False Negatives (FN)</i>	<i>True Negatives (TN)</i>

Gambar 3. *Confusion Matrix*.

Tahap *deployment* merupakan tahapan pembangunan sistem informasi yang berguna bagi pemangku kepentingan dari model yang telah dibangun dan dievaluasi. Perancangan sistem dilakukan setelah model deteksi terbaik telah dipilih pada tahapan evaluasi model. Pada tahap ini, akan diidentifikasi spesifikasi dari sistem yang dibutuhkan oleh pihak rumah sakit. Spesifikasi dari sistem didapatkan dengan membagi kebutuhan menjadi dua bagian yaitu kebutuhan fungsional dan kebutuhan non fungsional. *Output* dari sistem yang akan dihasilkan pada penelitian berupa purwarupa atau *prototype* yang dapat digunakan oleh pihak rumah sakit. Perancangan dari aplikasi dan *user interface* akan dilakukan dengan menggunakan *package Python* bernama *Streamlit*. *Streamlit* merupakan *framework* yang dapat ditulis dengan menggunakan bahasa pemrograman *Python* untuk membangun aplikasi *website*. Purwarupa yang telah dihasilkan akan diverifikasi dan divalidasi oleh pihak rumah sakit. Apabila terdapat bagian dari sistem yang perlu untuk dilakukan perbaikan, maka purwarupa dari sistem akan dimodifikasi untuk memenuhi revisi perbaikan yang diberikan oleh pihak rumah sakit. Gambar 4 menunjukkan diagram alir dari proses perancangan prototipe sistem secara lengkap.

Terakhir, pada penelitian ini akan dilakukan analisis serta penarikan kesimpulan dan saran. Analisis dan kesimpulan dilakukan terhadap pengolahan data dan juga perancangan sistem yang telah dibuat.



Gambar 4. Diagram Alir Perancangan Prototipe Sistem.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Identifikasi Kebutuhan Data

Penentuan fitur dan transformasi data dilakukan untuk memenuhi tahapan *data understanding* dan *data preparation* pada tahapan CRISP-DM. Fitur-fitur deteksi dipilih berdasarkan studi literatur dan beberapa fitur yang digunakan pada penelitian serupa mengenai deteksi penyakit preeklamsia pada ibu hamil. Fitur-fitur tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Fitur yang Diambil dari Penelitian Sebelumnya.

No	Data	Tipe	Penjelasan	Sumber Identifikasi
1	Umur	Numerik	Usia dari pasien kehamilan	(Marić dkk., 2020), (Sufriyana dkk., 2020), (Zhang dkk., 2019)
2	Umur Kehamilan	Numerik	Usia kehamilan dari pasien	(Roberts & Gammill, 2005)
3	Tinggi Badan	Numerik	Tinggi badan dari pasien kehamilan	(Marić dkk., 2020), (Zhang dkk., 2019)
4	Berat Badan	Numerik	Berat badan dari pasien kehamilan	(Zhang dkk., 2019)
5	Tekanan Darah	Numerik	Tekanan darah dari pasien kehamilan. Dibagi menjadi 2 bagian yaitu tekanan darah diastolik dan tekanan darah sistolik	(Marić dkk., 2020), (Poon & Nicolaides, 2014), (Zhang dkk., 2019)
6	Kehamilan ke-	Numerik	Urutan kehamilan dari pasien kehamilan	(Pittara, 2022)
7	Sejarah Penyakit	Kategori	Sejarah penyakit yang dimiliki oleh pasien kehamilan. Dibagi menjadi beberapa kategori riwayat penyakit	(Marić dkk., 2020), (Sufriyana dkk., 2020), (Zhang dkk., 2019), (Poon & Nicolaides, 2014)

Selain dari itu, fitur-fitur yang akan digunakan juga didapatkan dari hasil wawancara dengan dokter spesialis kandungan dari pihak RSIJPK. Fitur-fitur tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Fitur yang Diambil dari Hasil Wawancara dengan Dokter Spesialis.

No	Data	Tipe	Penjelasan	Sumber Identifikasi
1	Keluhan	Kategori	Keluhan fisik yang dirasakan oleh pasien. Contohnya adalah keluhan pusing, kejang, mual, dan sebagainya	Dokter Spesialis Kandungan
2	Albumin Urea	Numerik	Hasil uji laboratorium urin yang telah dilakukan pasien. Mengindikasikan keberadaan protein pada urin	Dokter Spesialis Kandungan
3	Trombosit	Numerik	Hasil uji laboratorium tes darah yang telah dilakukan pasien. Merepresentasikan jumlah sel darah putih	Dokter Spesialis Kandungan
4	Hb	Numerik	Hasil uji laboratorium tes darah yang telah dilakukan pasien. Merepresentasikan jumlah sel darah merah	Dokter Spesialis Kandungan
5	<i>Serum Glutamic-Oxaloacetic Transaminase (SGOT)</i>	Numerik	Hasil uji laboratorium tes fungsi hati yang telah dilakukan oleh pasien. Merepresentasikan jumlah enzim SGOT di dalam tubuh	Dokter Spesialis Kandungan
6	<i>Serum Glutamic Pyruvic Transaminase (SGPT)</i>	Numerik	Hasil uji laboratorium tes fungsi hati yang telah dilakukan oleh pasien. Merepresentasikan jumlah enzim SGPT di dalam tubuh	Dokter Spesialis Kandungan
7	Bilirubin	Kategori	Hasil uji laboratorium yang merepresentasikan jumlah bilirubin di dalam tubuh	Dokter Spesialis Kandungan

3.2. Pengumpulan Data Pasien dan Integrasi Data

Pemenuhan data yang dibutuhkan untuk keperluan penelitian menggunakan data yang didapatkan dari berkas rekam medis setiap pasien. Pada akhir dari tahapan pengumpulan data, dihasilkan sebanyak 109 data yang terdiri dari 48 data pasien positif preeklamsia dan 61 data pasien negatif preeklamsia. Selain dari itu, bagian dari berkas rekam medis yang akan diserap meliputi layanan rawat jalan, layanan rawat inap, fasilitas laboratorium. Data dari seluruh berkas tersebut disatukan ke dalam satu *dataset* untuk dilakukan analisis secara lebih lanjut. Tabel 3 menunjukkan rangkuman dari fitur-fitur yang telah berhasil dikumpulkan dari berkas rekam medis pasien milik RSIJPK.

Tabel 3. Fitur yang Berhasil Diambil.

No	Fitur	Peran	Pecahan dari Data
1	Risiko Preeklamsia	Target	-
2	Pusing	Prediktor	Keluhan
3	Pandangan Kabur	Prediktor	Keluhan
4	Kejang	Prediktor	Keluhan
5	Bagian Tubuh Bengkak	Prediktor	Keluhan
6	Sakit Perut/Mual	Prediktor	Keluhan
7	Umur	Prediktor	Umur
8	Umur Kehamilan	Prediktor	Umur Kehamilan
9	Tekanan Darah Diastolik	Prediktor	Tekanan Darah
10	Tekanan Darah Sistolik	Prediktor	Tekanan Darah
11	Kehamilan ke-	Prediktor	Kehamilan ke-
12	Riwayat Preeklamsia	Prediktor	Sejarah Penyakit
13	Riwayat Hipertensi Keluarga	Prediktor	Sejarah Penyakit
14	Riwayat Hipertensi	Prediktor	Sejarah Penyakit
15	Protein (Albumin Urea)	Prediktor	Albumin Urea
16	Trombosit	Prediktor	Trombosit
17	Hb	Prediktor	Hb
18	SGOT	Prediktor	SGOT
19	SGPT	Prediktor	SGPT
20	Bilirubin	Prediktor	Bilirubin

Tidak seluruh fitur yang disebutkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berhasil diserap dari data rekam medis pasien. Fitur tinggi badan dan berat badan tidak digunakan karena data tersebut tidak selalu tersedia untuk berkas rekam medis pasien ibu hamil sehingga dapat menyebabkan nilai *missing value* yang besar.

3.3. Prapemrosesan Data

Langkah pertama yang dilakukan yaitu penyesuaian bentuk data. Untuk melakukan pembersihan data, eksplorasi data, dan pembangunan model, tipe-tipe data yang digunakan perlu untuk dilakukan transformasi terlebih dahulu agar tipe data dapat sesuai dan seluruh tahapan dari analisis data dapat berjalan dengan mulus. Untuk bagian transformasi data, akan dilakukan beberapa penyesuaian sebagai berikut:

1. Fitur tekanan darah dibagi menjadi dua bagian yaitu tekanan darah sistolik dan tekanan darah diastolik.
2. Fitur keluhan dibagi menjadi lima bagian yaitu pusing, pandangan kabur, kejang, bengkak, dan sakit perut/mual.
3. Fitur sejarah penyakit dibagi menjadi tiga bagian yaitu riwayat preeklamsia, riwayat hipertensi keluarga, dan riwayat hipertensi pribadi.
4. Fitur bilirubin dibagi menjadi dua bagian yaitu positif dan negatif yang akan ditandai dengan *label* 1 atau 0.
5. Fitur protein dibagi menjadi dua bagian yaitu positif dan negatif yang akan ditandai dengan *label* 1 atau 0.

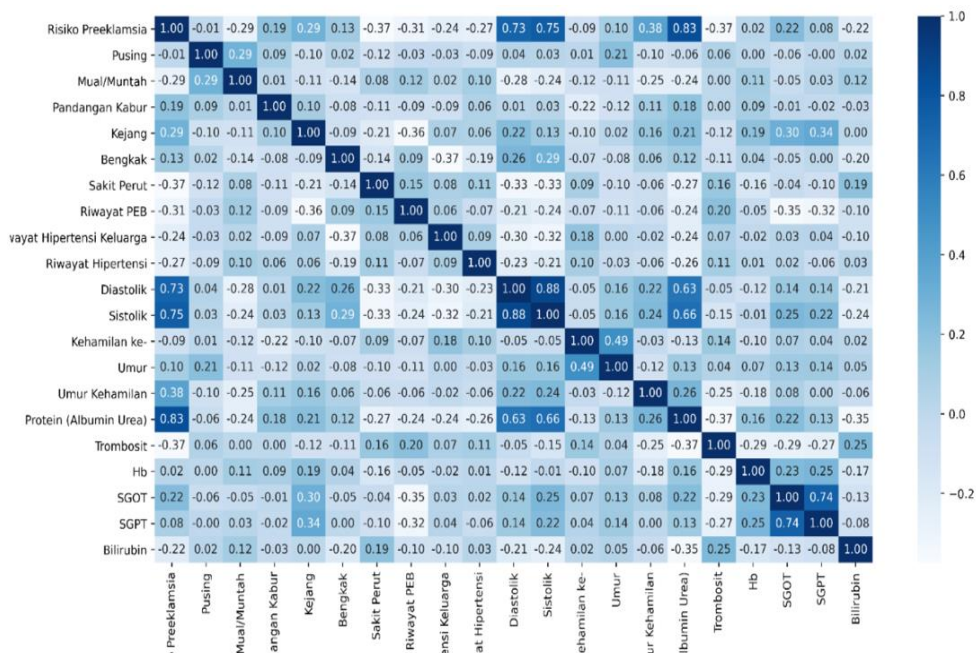
Dengan begitu, total fitur deteksi yang akan digunakan berjumlah sebanyak 19 buah. Setelah itu, akan ditambahkan satu fitur untuk dijadikan sebagai fitur target yaitu fitur Risiko preeklamsia. Risiko preeklamsia akan diberikan *label* positif apabila memiliki probabilitas yang tinggi untuk mengidap penyakit preeklamsia, sedangkan untuk *label* negatif, akan diberikan kepada pasien yang memiliki probabilitas yang rendah untuk mengidap penyakit preeklamsia.

Setelah fitur-fitur berhasil diidentifikasi secara lengkap, dilakukan transformasi data dengan menggunakan metode *label encoding* untuk fitur yang memiliki tipe data nominal agar menjadi tipe numerik sehingga dapat dimasukkan ke dalam model yang akan dibangun. Untuk fitur Pusing, Pandangan Kabur, Kejang, Bagian Tubuh Bengkak, dan Sakit Perut/Mual, perubahan tipe data nominal menjadi tipe numerik dilakukan melalui aplikasi *Microsoft Excel*, sedangkan untuk fitur-fitur lainnya, *Python* digunakan untuk mentransformasikan data. Untuk fitur protein (albumin urea) dan fitur bilirubin, nilai dari fitur tersebut diubah menjadi berlabel 1 atau 0 yang mengindikasikan keberadaan dari fitur-fitur tersebut di dalam tubuh pasien atau tidak. Jumlah yang semakin banyak tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tujuan utama dari sistem yang dibangun yaitu untuk mendeteksi Preeklamsia.

Setelah fitur-fitur pada *dataset* telah diidentifikasi secara lengkap serta dilakukan transformasi data agar dapat dimasukkan ke dalam model yang dibangun, langkah yang harus dilakukan berikutnya adalah tahapan pembersihan data. Pada tahapan ini, dilakukan penghapusan fitur yang memiliki peran kurang atau tidak signifikan terhadap fitur target. Selain dari itu, fitur yang memiliki nilai *missing value* lebih dari 50% juga dihapus dari peran prediktor. Fitur yang memiliki nilai *missing value* lebih dari 50% dianggap kurang efektif untuk dijadikan prediktor dalam model karena tidak dapat dilakukan imputasi nilai secara efektif (Hartini, 2016).

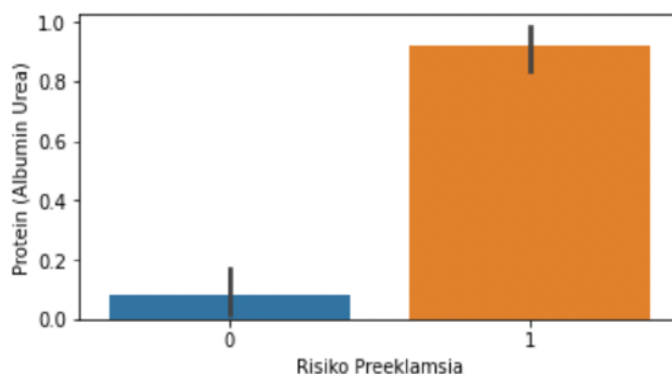
Terdapat 3 fitur yang memiliki jumlah *missing value* lebih besar atau sama dengan 50% yaitu fitur SGOT, SGPT, dan Bilirubin. Ketiga atribut tersebut dihapus dari model. Kemudian, dilakukan imputasi terhadap *missing values* yang terdapat pada *dataset*. Metode imputasi yang dilakukan ada dengan metode *similar case imputation* yaitu dengan cara menggantikan nilai kosong pada suatu kolom dengan nilai rata-rata untuk fitur numerik dan nilai modus untuk fitur nominal.

Setelah dilakukan pembersihan data, selanjutnya dilakukan pemilihan fitur prediktor. Sebelum tahapan konstruksi model, perlu dipilih fitur-fitur prediktor yang memiliki signifikansi yang tinggi pada fitur target. Tujuan dari dilakukannya proses pemilihan fitur prediktor adalah agar dapat mengoptimalkan performa model, mengurangi ongkos komputasi dan pengumpulan data, serta mengurangi kebisingan yang dapat mengakibatkan bias pada model. Oleh karena itu, perlu dilakukan *exploratory data analysis* untuk memvisualisasikan dan memutuskan jenis-jenis fitur yang akan dimasukkan ke dalam model deteksi preeklamsia. Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa terdapat beberapa fitur yang memiliki nilai korelasi tinggi, korelasi sedang, dan korelasi rendah terhadap target.

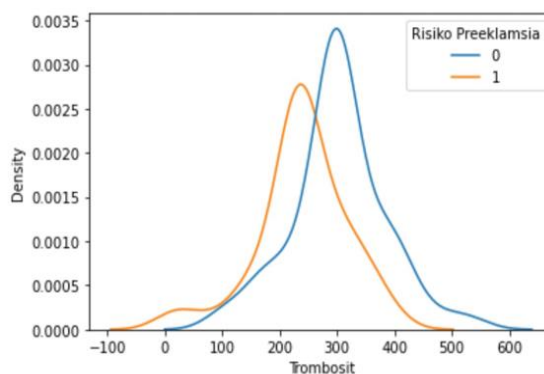


Gambar 5. Heatmap Fitur-Fitur Prediktor.

Besar angka korelasi akan berkisar antara nilai 0 sampai dengan 1. Selanjutnya, akan dipilih fitur-fitur yang memiliki angka korelasi lebih besar atau sama dengan 0,20. Prediktor yang memiliki nilai korelasi tertinggi adalah variabel Protein (Albumin Urea) dengan nilai korelasi sebesar 0,83, sedangkan prediktor yang memiliki nilai korelasi rendah namun masih dapat dipertimbangkan untuk dimasukkan ke dalam model deteksi Preeklamsia adalah fitur pandangan kabur dengan nilai korelasi sebesar 0,19. Fitur pandangan kabur memiliki koefisien korelasi yang sangat rendah. Namun, karena nilainya sangat mendekati tingkat hubungan rendah dan keluhan fisik pandangan kabur divalidasi oleh dokter sebagai salah satu fitur yang dapat digunakan untuk mendeteksi Preeklamsia, maka fitur pandangan kabur tetap dimasukkan ke dalam model. Selanjutnya, variabel prediktor yang memiliki tipe data nominal akan dibuatkan visualisasi *bar chart* agar dapat dilihat perbandingan probabilitas suatu kategori terhadap fitur target, sedangkan variabel prediktor yang memiliki tipe data numerik dibuatkan visualisasi *kdeplot* agar dapat ditemukan apabila terdapat nilai atau titik-titik tertentu yang cenderung untuk memiliki pengaruh probabilitas lebih besar terhadap fitur target. Contoh dari *bar chart* yang dibuatkan untuk fitur prediktor bertipe nominal dapat dilihat pada Gambar 6. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa pasien-pasien yang memiliki risiko positif untuk mengidap penyakit preeklamsia cenderung untuk memiliki keberadaan protein pada darah, diindikasikan dengan ukuran dari *bar* yang lebih tinggi terhadap nilai rata-rata dari fitur protein (albumin urea). Contoh dari *kdeplot* yang dibuatkan untuk fitur prediktor terhadap fitur target dapat dilihat pada Gambar 7. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa pasien-pasien yang memiliki risiko positif untuk mengidap preeklamsia cenderung untuk memiliki jumlah sel darah putih atau trombosit yang lebih rendah. Dapat disimpulkan bahwa fitur prediktor yang akan dimasukkan ke dalam model deteksi yaitu Mual/Muntah, Pandangan Kabur, Kejang, Bengkak, Sakit Perut, Riwayat PEB, Riwayat Hipertensi Keluarga, Riwayat Hipertensi, Umur Kehamilan, Diastolik, Sistolik, Protein (Albumin Urea), dan Trombosit.



Gambar 6. Bar Chart Fitur Protein vs Fitur Target.



Gambar 7. Kdeplot Persebaran Angka Trombosit terhadap Risiko Preeklamsia.

Setelah data dibersihkan dan siap untuk dimasukkan ke dalam model deteksi, langkah yang harus dilakukan berikutnya adalah membagi *dataset* menjadi 2 bagian, yaitu *train set* dan *test set*. *Train set* merupakan bagian yang akan digunakan untuk melakukan pembangunan dengan melatih model, sedangkan *test set* merupakan bagian yang akan digunakan untuk melakukan pengujian terhadap performa model. Proporsi yang akan digunakan adalah 70% untuk *train set* dan 30% untuk *test set*. Penggunaan proporsi 70% untuk *train set* dan 30% untuk *test set* dalam pembagian *dataset* adalah praktek yang umum dilakukan (Prabhakaran, 2023). Selain itu, studi empiris menunjukkan bahwa hasil terbaik dapat diperoleh jika 20-30% data digunakan untuk pengujian, dan sisanya 70-80% data digunakan untuk pelatihan (Gholamy dkk., 2018). Namun, proporsi pembagian dataset ini tidak bersifat kaku dan bisa disesuaikan berdasarkan kebutuhan penelitian (Prabhakaran, 2023). Pada penelitian ini, pembagian dataset menghasilkan data train set sebanyak 76 dan data test set sebanyak 33.

3.4. Pembangunan Model Deteksi

Setelah fitur-fitur prediktor yang akan dimasukkan ke dalam model deteksi telah ditentukan serta *dataset* telah dibagi menjadi 2 bagian, yaitu *train set* dan *test set*, tahapan berikutnya adalah dengan menggunakan berbagai algoritma berbeda untuk membandingkan hasil dan performa dari model yang berhasil dibangun. Algoritma klasifikasi yang akan digunakan pada tahapan konstruksi model meliputi algoritma *decision tree*, *support vector machine*, *naïve bayes*, *logistic regression*, *k-nearest neighbors*, dan *random forest*.

Tahapan utama yang dilakukan pada konstruksi model adalah menetapkan variabel *random state* agar menghindari kemungkinan untuk mendapatkan hasil performa yang berbeda-beda setiap kali model dibangun dengan menggunakan algoritma yang sama. Selain dari itu, penggunaan nilai *random state* yang sama membuat perbandingan dari performa model menjadi semakin objektif karena menggunakan persebaran data yang sama. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa algoritma *logistic regression* memiliki performa yang terbaik dan tidak mengalami *overfitting* diindikasikan oleh nilai *test score* dan *train score* yang sama. Oleh karena itu, 10-fold *cross validation* dilakukan pada algoritma *logistic regression* dengan kombinasi dari parameter-parameter yang digunakan pada model, atau yang biasa disebut dengan *hyperparameter tuning*. Percobaan kombinasi dari parameter-parameter tersebut sehingga didapatkan nilai yang optimal dapat dilakukan dengan menggunakan metode *grid search*. *Hyperparameter* yang akan dicari kombinasi terbaiknya terdiri dari Nilai C, solver, dan max iteration dengan nilai-nilai sebagai berikut.

1. Nilai C [100, 10, 1.0, 0.1, 0.01]
2. Solver ['lbfgs', 'newton-cg', 'liblinear', 'sag', 'saga']
3. Max Iteration [100, 1000, 2500, 5000]

3.5. Evaluasi Model Deteksi

Setelah seluruh model berhasil dibangun, perlu dilakukan evaluasi model untuk membandingkan performansi dari seluruh model deteksi yang telah dibangun dengan berbagai algoritma yang berbeda. Pada Tabel 4 dapat dilihat rangkuman dari performa seluruh model yang dibangun dalam penelitian ini.

Tabel 4. Performa Model.

Algoritma	Akurasi	Presisi	Recall	F1-Score	AUC	Train Score	Test Score
<i>Decision Tree</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Support Vector Machine</i>	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%
<i>Naïve Bayes</i>	73%	91%	56%	69%	74%	84%	73%
<i>Logistic Regression</i>	97%	95%	100%	97%	97%	97%	97%
<i>K-Nearest Neighbors</i>	94%	100%	89%	94%	94%	95%	94%
<i>Random Forest</i>	97%	100%	94%	97%	97%	100%	97%

Dalam melakukan evaluasi model, metrik akurasi dan presisi dipilih sebagai metrik utama dalam keputusan pemilihan model. Alasan digunakan *precision* adalah karena model tidak ingin salah mendeteksi pasien yang sebenarnya memiliki risiko tinggi untuk mengidap preeklamsia namun dideteksi tidak memiliki risiko tinggi untuk mengidap preeklamsia oleh model. Hal tersebut dapat berakibat fatal dan bahkan dapat memakan korban manusia.

Pada proses pemilihan model, tingkat performansi model yang mencapai 100% untuk seluruh metrik bukan merupakan performa yang baik karena ada kemungkinan bahwa model yang dibuat memiliki kendala *overfitting* (Ying, 2019). Hal tersebut dapat memiliki arti bahwa model yang dibangun dapat memprediksi data yang tersedia dengan baik, namun ada kemungkinan bahwa tidak dapat memprediksi data-data yang belum pernah dilihat sebelumnya dengan akurat. Menurut (Ying, 2019), terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan untuk mengurangi *overfitting* pada *dataset*, diantaranya yaitu *early stopping*, *regularization*, dan memilih model dengan kompleksitas rendah. Dalam pembangunan model deteksi Preeklamsia pada penelitian ini, telah dilakukan beberapa langkah tersebut dalam upaya untuk mengurangi potensi *overfitting* sebagai berikut.

1. *Early stopping*

Pada penelitian ini telah dilakukan percobaan terhadap beberapa proporsi antara data pelatihan dengan data pengujian yang berbeda-beda. Tahapan tersebut dilakukan untuk menemukan titik dimana penghentian pelatihan data perlu untuk dilakukan sehingga ditemukan titik yang memiliki keseimbangan antara performa pelatihan dengan performa pengujian.

2. *Regularization*

Pada penelitian ini dilakukan pemilihan fitur prediktor untuk mengurangi dimensi dari *dataset* sebelum dimasukkan ke dalam model deteksi. Pada pembelajaran mesin, semakin banyak fitur yang digunakan untuk dijadikan sebagai data pelatihan, maka tingkat kerumitan dari model juga akan meningkat. Model-model yang cenderung untuk mengalami *overfitting* adalah model-model yang memasukkan seluruh fiturnya ke dalam model yang dibangun. Terlebih lagi apabila *dataset* yang digunakan berjumlah relatif kecil (Ying, 2019). Oleh karena itu, pada pembangunan model deteksi Preeklamsia pada pasien kehamilan, hanya digunakan fitur-fitur yang memiliki signifikansi tinggi terhadap diagnosis berdasarkan hasil perhitungan statistik dan juga hasil validasi oleh dokter spesialis kandungan.

3. Memilih Model dengan Kompleksitas Rendah

Perlu diingat bahwa jumlah data yang digunakan untuk pelatihan dan pengujian model berjumlah relatif kecil. Oleh karena itu, kompleksitas model juga memiliki peranan penting untuk mengurangi potensi *overfitting*. Pelatihan model secara sederhana adalah kegiatan yang dilakukan untuk membuat parameter-parameter dari model agar memiliki nilai yang optimal sehingga dapat menghasilkan performa yang memuaskan. Semakin kompleks model, semakin banyak parameter yang perlu untuk ditemukan nilai optimalnya, mengakibatkan jumlah data pelatihan yang diperlukan juga meningkat. Oleh karena itu, pilihan yang dapat dilakukan adalah antara menambah jumlah data pelatihan atau menurunkan tingkat kompleksitas dari model (Ying, 2019). Maka, model *logistic regression* dipilih karena merupakan salah satu model yang memiliki tingkat kompleksitas rendah apabila dilihat dari jumlah *hyperparameter*. Penambahan jumlah pelatihan tidak dapat dilakukan karena terdapat beberapa kebijakan dari rumah sakit yang membatasi jumlah data yang dapat diambil.

Berdasarkan matrik evaluasi model yang dipilih yaitu tingkat akurasi dan tingkat presisi, *logistic regression* dipilih sebagai algoritma yang dipilih karena memiliki tingkat akurasi dan presisi yang tinggi yaitu sebesar 97% dan 95%. Untuk melihat apakah model memiliki kecenderungan untuk *overfit*, dapat dilihat dari nilai *train score* dan *test score*. Model yang dibangun memiliki nilai *train score* dan *test score* sebesar 97% dan 97%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model yang dibangun tidak mengalami *overfit* karena nilai akurasi dari data pelatihan dan nilai akurasi dari data-data yang belum pernah dilihat sebelumnya yaitu *data testing* memiliki nilai yang hampir sama (Subramanian & Simon, 2013).

Setelah itu, dilakukan perubahan proporsi *data splitting* dari 70:30 menjadi 55:45 yang meningkatkan performansi dari model menjadi memiliki tingkat akurasi sebesar 98% dan tingkat presisi sebesar 100% tanpa mengalami *overfit* karena memiliki nilai tes dan nilai latih yang sama yaitu sebesar 98%. Terakhir, dilakukan proses *hyperparameter tuning* dalam upaya untuk meningkatkan performansi model. Namun, kegiatan tersebut justru menurunkan nilai akurasi dari model menjadi 91%. Oleh karena itu, digunakan pembangunan model yang tidak menggunakan *hyperparameter tuning* dengan proporsi *splitting data* 55:45.

3.6. Perancangan Prototipe Sistem

Setelah model dibangun, dievaluasi, dan siap untuk digunakan oleh pengguna, langkah yang harus dilakukan berikutnya adalah merancang prototipe yang bersesuaian dengan kebutuhan pengguna. Tahapan ini merupakan fase *deployment* pada siklus CRISP-DM. Model deteksi yang telah dibangun akan ditampilkan dan digunakan melalui prototipe aplikasi sederhana. Halaman utama dari prototipe aplikasi yang dirancang pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Halaman Utama Prototipe Aplikasi.

Kesimpulan

Algoritma yang digunakan untuk membangun model deteksi Preeklamsia pada pasien kehamilan di RSIJPK adalah algoritma *logistic regression* karena memiliki performa dan generalisasi terbaik apabila dibandingkan dengan algoritma lainnya. Algoritma *logistic regression* dengan proporsi *splitting data* sebesar 55:45 menghasilkan nilai akurasi sebesar 98% dan nilai presisi sebesar 100%. Algoritma *decision tree* yang juga digunakan dalam penelitian ini menghasilkan nilai akurasi sebesar 100% dan nilai presisi sebesar 100%, hal ini mengindikasikan bahwa algoritma *decision tree* mengalami *overfitting*. Berdasarkan hasil diskusi dengan dokter spesialis kandungan, studi literatur yang dilakukan sebelum penelitian, dan proses eksplorasi serta pra pemrosesan data, diperoleh sebanyak 12 fitur prediktor Preeklamsia yang terdiri dari protein (albumin urea), diastolik, sistolik, umur kehamilan, trombosit, sakit perut, riwayat PEB, kejang, mual/muntah, riwayat hipertensi, riwayat hipertensi keluarga, dan pandangan kabur.

Pada penelitian ini juga dirancang suatu sistem deteksi yang dapat digunakan oleh *user* untuk melakukan deteksi terhadap penyakit preeklamsia pada pasien kehamilan. *User* yang dimaksud terbagi menjadi 3 pihak yaitu dokter spesialis kandungan, tenaga medis RSIJPK, dan pasien kehamilan. Dalam melakukan perancangan sistem deteksi preeklamsia, dilakukan identifikasi kebutuhan fungsional dan nonfungsional dari sistem berdasarkan kebutuhan dari pihak RSIJPK. Rancangan sistem dibangun dalam bentuk prototipe yang dibuat dengan menggunakan *packages streamlit python*. Setelah prototipe berhasil dibuat, dokter spesialis kandungan akan secara langsung melakukan verifikasi dan validasi atas tampilan, fitur, dan performa dari sistem yang dibangun. Sistem deteksi Preeklamsia yang dibangun diharapkan dapat membantu pihak RSIJPK agar dapat mengidentifikasi pasien-pasien yang memiliki risiko tinggi untuk mengidap penyakit preeklamsia.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diajukan beberapa saran untuk penelitian berikutnya yakni sebagai berikut:

1. Menambahkan jumlah data pelatihan agar dapat meningkatkan tingkat keyakinan dari korelasi antara fitur prediktor dengan fitur target. Selain dari itu, menurunkan kemungkinan untuk terjadi *overfitting*.
2. Menggunakan fitur-fitur seperti SGOT, SGPT, dan bilirubin karena memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil diagnosis risiko preeklamsia pada pasien. Untuk itu, perlu dilakukan pengumpulan data-data pasien yang telah melakukan uji laboratorium terkait dalam jumlah yang lebih besar.
3. Menambahkan fitur-fitur yang belum tersedia pada data rekam medis milik RSIJPK misalkan atribut detak jantung janin pada kandungan karena memiliki signifikansi yang cukup tinggi untuk mendiagnosis risiko preeklamsia pada pasien kehamilan berdasarkan studi literatur yang dilakukan

Daftar Pustaka

- Baharuddin, M., Amelia, D., Suhowatsky, S., Kusuma, A., Suhargono, M. H., & Eng, B. (2019). Maternal death reviews: A retrospective case series of 90 hospital-based maternal deaths in 11 hospitals in Indonesia. *International Journal of Gynecology and Obstetrics*, 144, 59–64.
- Chaemsaihong, P., Sahota, D. S., & Poon, L. C. (2022). First trimester preeclampsia screening and prediction. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 226(2), 1071-1097.
- Draelos, R. (2019). *Measuring Performance: The Confusion Matrix*. <https://glassboxmedicine.com/2019/02/17/measuring-performance-the-confusion-matrix/>
- Gholamy, A., Kreinovich, V., & Kosheleva, O. (2018). *Why 70/30 or 80/20 relation between training and testing sets: A pedagogical explanation*. https://scholarworks.utep.edu/cs_techrep/1209/
- Hartini, E. (2016). Efficiency comparison of method of handling missing value in data evaluation system or component. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/1561/>
- Kustiyahningsih, Y., Mula'ab, & Hasanah, N. (2020). Metode Fuzzy ID3 untuk klasifikasi status preeklamsi ibu hamil. *Teknika*, 9(1), 74–80.
- Marić, I., Tsur, A., Aghaeepour, N., Montanari, A., Stevenson, D. K., Shaw, G. M., & Winn, V. D. (2020). Early prediction of preeclampsia via machine learning. *American Journal of Obstetrics & Gynecology MFM*, 2(2), 100100.
- Nair, A. (2021). *Improve Your Hyperparameter Tuning Experience With The Random Search*. <https://towardsdatascience.com/improve-your-hyperparameter-tuning-experience-with-the-random-search-2c05d789175f>
- Niakšu, O. (2015). CRISP data mining methodology extension for medical domain. *Baltic J. Modern Computing*, 3(2), 92–109.
- Obenshain, M. K. (2004). Application of data mining techniques to healthcare data. *Infection control and hospital epidemiology*, 25(8), 690–695.
- Pittara. (2022). *Preeklamsia*. <https://www.alodokter.com/preeklamsia>
- Poon, L. C., & Nicolaides, K. H. (2014). Early prediction of preeclampsia. *Obstetrics and Gynecology International*, 2014, 1–11.
- Prabhakaran, S. (2023). *Train test split - How to split data into train and test for validating machine learning models?* <https://www.machinelearningplus.com/machine-learning/train-test-split/>
- Roberts, J. M., & Gammill, H. S. (2005). Preeclampsia. *Hypertension*, 46(6), 1243–1249.
- Silwattananusarn, T., & KulthidaTuamsuk, A. (2012). Data mining and its applications for knowledge management : A literature review from 2007 to 2012. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDKP)*, 2(5). <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2012.2502>
- Subramanian, J., & Simon, R. (2013). Overfitting in prediction models – is it a problem only in high dimensions? *Contemporary Clinical Trials*, 36(2), 636–641.
- Sufriyana, H., Wu, Y.-W., & Su, E. C.-Y. (2020). Artificial Intelligence-assisted prediction of preeclampsia: Development and external validation of a nationwide health insurance dataset of the BPJS kesehatan in Indonesia. *EBioMedicine*, 54, 102710.
- World Health Organization. (2023). *Maternal mortality*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/maternal-mortality>
- Ying, X. (2019). An overview of overfitting and its solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1168, 022022.
- Zhang, J., Han, L., Li, W., Chen, Q., Lei, J., Long, M., Yang, W., Li, W., Zeng, L., & Zeng, S. (2019). Early prediction of preeclampsia and small-for-gestational-age via multi-marker model in Chinese pregnancies: A prospective screening study. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 19(1).

***Reliability Index Assessment-Section Technique* pada Distribusi Listrik Penyulang Suci Menggunakan *Software* ETAP**

Fauzia Haz¹, Arya Mustopa¹, Giri Angga Setia¹, Dede Furqon¹,
Atik Charisma¹, dan M. Reza Hidayat¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia
fauzia.haz@lecture.unjani.ac.id, aryamustopa04@gmail.com, giri.angga.setia@lecture.unjani.ac.id,
dede.furqon@lecture.unjani.ac.id, atik.charisma@lecture.unjani.ac.id, mreza@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Masalah yang sering terjadi pada jaringan distribusi listrik adalah kualitas, kontinuitas dan ketersediaan layanan kepada konsumen. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sistem distribusi listrik tegangan menengah 20 kV pada penyulang Suci ULP Garut Kota, dimana pada tahun 2021 penyulang Suci mengalami 14 kali gangguan dengan durasi 791 menit (13,1 Jam), diantaranya ada saluran udara tegangan menengah putus 2 *Phase* dan adanya ledakan akibat terkena layangan. Dalam menentukan nilai indeks keandalan sistem pendistribusian listrik penyulang Suci ULP Garut Kota ini dilakukan perhitungan secara matematis menggunakan metode *RIA-section technique* dengan rumus yang telah ditentukan serta disimulasikan menggunakan *software* ETAP dengan *study case reliability assessment*. Berdasarkan hasil penelitian ini dilakukan suatu perbaikan agar nilai keandalan penyulang stabil. Perbaikan dilakukan 2 kali, untuk perbaikan yang pertama dipasang 2 buah *Fuse cut out* dan memindahkan 4 buah transformator, sedangkan perbaikan kedua ialah membagi penyulang Suci menjadi 2 bagian, yaitu penyulang Suci barat dan penyulang Suci timur. Maka dengan melakukan perbaikan tersebut indeks keandalan pada penyulang Suci menjadi stabil dan memenuhi apa yang telah ditetapkan oleh SPLN 68-2: 1986 yaitu dibawah SAIFI 3,3 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI 21,9 jam/pelanggan/tahun.

Kata kunci: Distribusi Listrik, ETAP, Indeks Keandalan, *RIA-section technique*

Abstract

Problems that often occur with electricity distribution network quality, continuity and availability services consumers. Study aims evaluate reliability of the 20 kV medium-voltage electricity distribution system at the Suci ULP Garut Kota feeder, where 2021 Suci feeder experienced 14 disturbances duration 791 minutes (13.1 hours), including a medium-voltage overhead line that broke 2 Phase. Determining the reliability index value electricity distribution system of the Kudus ULP Garut City feeder, mathematical calculations were carried out using *RIA-section technique* predetermined formula and simulated using ETAP software with study case reliability assessment. Based on the results of the study, improvement was made that the reliability value feeder was stable. Repairs were carried out 2 times, first repair, 2 fuse cutouts were installed and 4 transformers were moved, while the second repair was to divide the Suci feeder into 2 parts, namely the western Suci feeder and the eastern Suci feeder. So making these improvements the reliability index Suci feeder becomes stable and meets what has been SPLN 68-2: 1986, which is below SAIFI 3.3 times/customer/year and SAIDI 21.9 hours/customer/year.

Keywords: Electrical Distribution, ETAP, Reliability Index, *RIA-section technique*

1. Pendahuluan

Pelayanan listrik yang sesuai harapan pelanggan sangat bergantung pada kualitas dan keandalan distribusi tenaga listrik. Keandalan yang dimaksud bisa diartikan sebagai tidak adanya gangguan *system* (Hidayatullah, 2017) dan berlangsung secara kontinu. Gangguan banyak terjadi akibat sistem yang tidak andal, maka diperlukan suatu perbaikan untuk menanggulangi gangguan menjadi sistem distribusi yang dikatakan Keandalan distribusi memainkan peran penting dalam keamanan dan kenyamanan masyarakat, lembaga pendidikan, lembaga pemerintah dan bisnis. Indeks keandalan sistem distribusi adalah metode untuk mengevaluasi parameter nilai keandalan peralatan distribusi (Hidayatullah, 2017). Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, (Fatoni dkk., 2016) menggunakan metode FMEA, yang mana setiap komponen dan peralatan dihitung dengan detail berapa keandalan pada komponen tersebut, akan tetapi pada penelitian ini tidak disimulasikan menggunakan *software* pendukung untuk memvalidasi penelitian tersebut (Putri Hesti & Nugraha, 2023)

Info Makalah:

Dikirim : 06-22-23;
Revisi 1 : 11-10-23;
Revisi 2 : 12-12-23;
Diterima : 02-28-24.

Penulis Korespondensi:

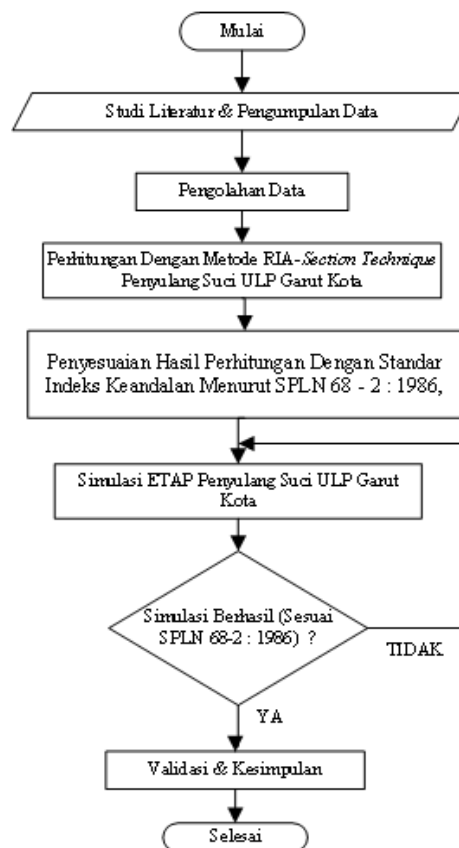
Telp : +62-852-5590-8299
e-mail : fauzia.haz@unjani.ac.id

Analisis suatu keandalan sistem distribusi membutuhkan cakupan yang luas sehingga dibutuhkan metode yaitu *section technique*. Penyulang Suci ULP Garut Kota merupakan salah satu daerah yang memiliki sistem keandalan pendistribusian listrik yang kurang baik. Pada penyulang Suci telah terjadi 14 kali gangguan atau kegagalan dengan durasi 791 menit (13,1 Jam) pada tahun 2021, diantaranya ada SUTM putus 2 *Phase* dan adanya ledakan akibat SUTM terkena layangan. Oleh karena itu, perlu untuk mempertimbangkan tingkat

keandalan sistem distribusi 20 kV dengan metode RIA (*Reliability Indeks Assessment*) – *section technique* (Luthfiyani dkk., 2023). Dalam menentukan nilai keandalan sistem pendistribusian ini dilakukan perhitungan secara matematis menggunakan metode RIA-*section technique* (Maliky & Haryudo, 2020) dengan rumus yang telah ditentukan serta disimulasikan menggunakan *software* ETAP dengan *study case Reliability Assessment* (RA), kemudian tingkat keandalan sistem pendistribusian listrik penyulang Suci akan disesuaikan dengan standar SPLN 68-2 : 1986. Selain itu untuk mengetahui tingkat keandalan maka perlu diketahui indeks-indeks keandalan yaitu SAIDI dan SAIFI(Sanaky dkk., t.t.).

2. Metode

Data diolah dan dihitung menggunakan metode RIA-*section technique*, hasil dari perhitungan matematis kemudian disesuaikan dengan SPLN 68-2 : 1986. Hasil penyesuaian disimulasikan menggunakan *software* ETAP dengan melakukan 2 simulasi yaitu simulasi sebelum perbaikan dan sesudah perbaikan. Hasil dari setelah perbaikan dapat dijadikan rekomendasi kepada pihak PLN untuk menstabilkan nilai indeks keandalan penyulang Suci ULP Garut Kota



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Hasil pengumpulan data lapangan meliputi gambar 1 *Single Line Diagram* penyulang Suci ULP Garut kota, jumlah pelanggan penyulang Suci tahun 2021, data komponen pada penyulang Suci ULP Garut Kota, data gangguan selama satu tahun (2021) Penyulang Suci ULP Garut Kota, data trafo dan beban penyulang Suci ULP Garut Kota tahun 2021. Data diolah dan dihitung menggunakan metode RIA-*section technique* (Kusuma dkk., 2022), hasil dari perhitungan matematis kemudian disesuaikan dengan SPLN 68-2: 1986 (Prayogi, 2021). Hasil matematis disimulasikan menggunakan *software* ETAP dengan melakukan 2 simulasi yaitu simulasi sebelum perbaikan dan sesudah perbaikan. Hasil dari setelah perbaikan dapat dijadikan rekomendasi kepada pihak PLN.

2.1. Metode RIA (*Reliability Index Assessment*)-*Section Technique*

Metode RIA (*Reliability Index Assessment*)-*Section Technique* ialah suatu metode gabungan dari 2 metode yaitu metode RIA dan metode *section technique*. Metode RIA adalah metode pendekatan yang digunakan untuk memprediksi kegagalan jaringan distribusi daya sesuai dengan topologi sistem dan data keandalan komponen RIA secara komprehensif mencatat kesalahan yang terjadi pada komponen, mengidentifikasi kesalahan, dan menganalisis mode kegagalan. Sedangkan metode *section technique* merupakan metode membagi sistem menjadi beberapa bagian yang lebih kecil untuk mengevaluasi keandalan sistem, tetapi juga meminimalkan terjadinya kesalahan dan mengurangi waktu yang diperlukan (Budi dkk., 2015).

SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dapat didefinisikan sebagai jumlah rata-rata pemadaman yang dialami oleh konsumen yang mengoperasikan sistem selama periode waktu tertentu (biasanya satu tahun). Indeks SAIFI dipengaruhi oleh pembagian jumlah pemadaman untuk semua konsumen dalam waktu satu tahun dengan jumlah semua pelanggan yang dipasok. Rumus Persamaan SAIFI dapat dilihat sebagai berikut:

$$SAIFI = \frac{\sum (\lambda_i \cdot Ni)}{\sum N} \quad (1)$$

SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dapat didefinisikan sebagai durasi rata-rata pemadaman yang dialami pelanggan sepanjang tahun. Indeks ini diperoleh dengan membagi jumlah gangguan yang sedang berlangsung untuk semua konsumen dalam periode waktu tertentu dengan jumlah pelanggan yang melayani tahun tersebut. Rumus Persamaan SAIDI dapat dilihat sebagai berikut :

$$SAIDI = \frac{\sum (Ui \cdot Ni)}{\sum N} \quad (2)$$

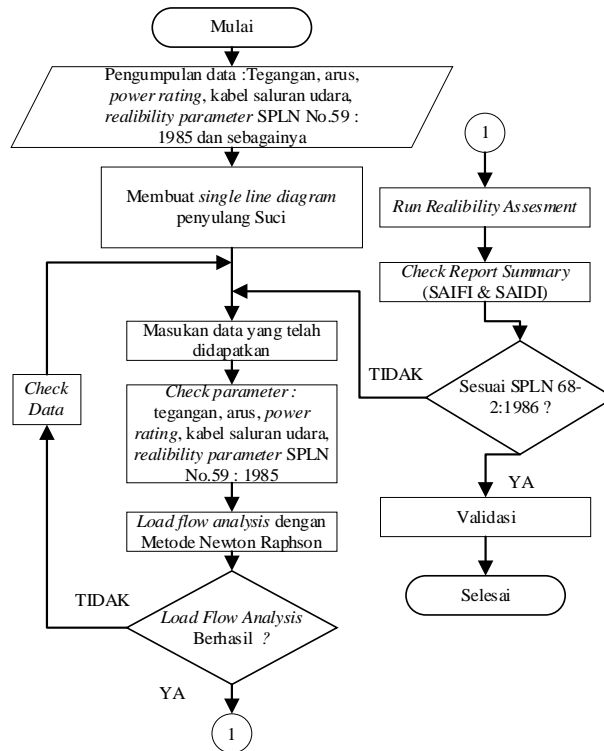
Analisis indeks keandalan pada sistem pendistribusian listrik dengan metode RIA-*section technique* tentunya sangat mempermudah untuk menentukan indeks keandalan pada suatu sistem pendistribusian listrik, untuk mencari frekuensi kegagalan pada sebuah peralatan, maka digunakan rumus :

$$\lambda_i = (\lambda_L + \text{Momentary}) \times \text{Panjang Saluran} \quad (3)$$

Sedangkan untuk mencari durasi kegagalan menggunakan rumus :

$$U = \lambda_i \cdot \text{repair time} \quad (4)$$

Simulasi *software* ETAP terdapat beberapa tahapan, dari mulai memasukkan data yang diperlukan, membuat *single line* diagram, sampai validasi pemodelan selesai. Berikut tahapan pemodelan simulasi menggunakan *software* ETAP (Faruq et al., 2021). Pengumpulan data lapangan yang dibutuhkan pada saat pemodelan menggunakan *software* ETAP adalah tegangan, *power rating* pada transformator, beban yang dimiliki oleh transformator, kabel pada jaringan (tipe kabel, panjang kabel, dan *rating* kabel) serta *reliability* menurut SPLN no. 59 : 1985. Data yang telah diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam setiap komponen yang dibutuhkan, dari mulai transformator, beban, kabel, dan lain-lain. Periksa parameter untuk meminimalisir terjadinya kesalahan saat melakukan simulasi. Ada beberapa yang harus diperiksa parameternya dan harus sesuai dengan data yang telah didapatkan, yaitu transformator, kabel pada jaringan (tipe kabel, panjang kabel, dan *rating* kabel) serta *reliability* menurut SPLN no.59 : 1985, dan lain-lain. *Load flow analysis* ialah langkah awal untuk melakukan simulasi keandalan pada sistem, dengan menjalankan *load flow analysis* akan mengetahui apakah rangkaian sudah berhasil dijalankan (disimulasikan), yang mana pada simulasi aliran daya ini menggunakan metode Newton Raphson (Laboratory, t.t.). Apabila tidak dapat disimulasikan *load flow analysis*, maka telah terjadi kesalahan pada saat membuat *single line* diagram atau terjadi kesalahan. Menjalankan *study case reliability assessment* merupakan bagian inti dari simulasi penelitian ini, dan dilihat dari hasil *report summary* untuk mengetahui indeks keandalan SAIFI & SAIDI. Menyesuaikan hasil *report summary* dengan indeks keandalan menurut SPLN 68-2:1986, apakah perlu perbaikan untuk penyulang Suci ULP Garut Kota. Apabila perbaikan telah selesai, dilakukan validasi bahwa penyulang suci sudah sesuai indeks keandalan nya dengan standar yang telah ditetapkan.

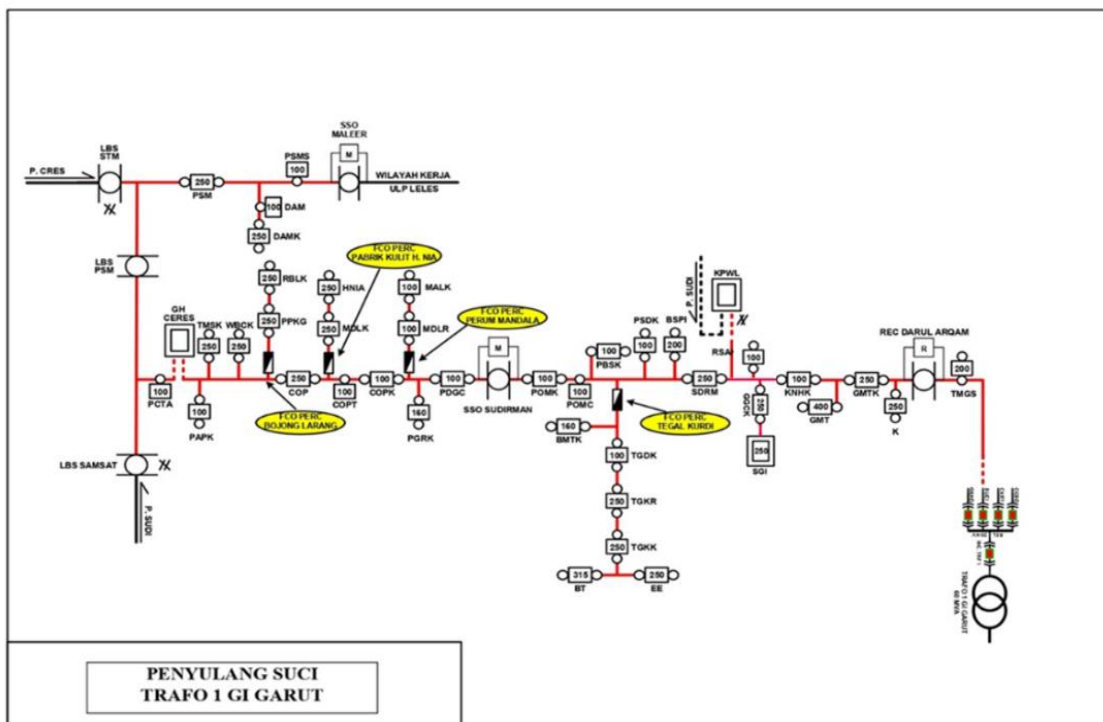


Gambar 2. Diagram Simulasi ETAP.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Penyulang Suci ULP Garut Kota

Penyulang Suci merupakan bagian dari ULP Garut Kota yang mana merupakan salah satu penyulang di kota Garut yang terletak dekat dengan pusat kota yang terdiri dari berbagai kantor pemerintahan daerah, pusat perbelanjaan, pusat kesehatan seperti klinik, dan rumah sakit serta pusat pendidikan seperti adanya universitas, dan lain-lain. Berikut *single line diagram* penyulang Suci ULP Garut kota



Gambar 3. Single Line Diagram Penyulang Suci.

Single line diagram penyalang Suci ULP Garut Kota memiliki panjang penyalang 63,07 kms, pada penyalang Suci trafo 1 GI Garut terdapat 41 transformator dan gardu distribusi serta masing-masing FCO (*Fuse Cut Out*) yang menempel di atas transformator distribusi, termasuk gardu portal, gardu cantol dan gardu tembok. Kemudian terdapat 44 *line* 4 buah FCO percabangan, 1 buah *recloser*, dan 1 buah SSO serta 1 buah LBS. Pelanggan pada penyalang Suci memiliki 12.789 pelanggan dengan 41 gardu distribusi yang mana akan dibagi lagi dengan 2 bagian. Setiap bagian akan dibatasi oleh *recloser* dan *sectionalizer* atau sering disebut SSO serta LBS (*Load Break Switch*) yang mana ini adalah salah satu langkah awal menggunakan metode *RIA-Section Technique*. Dapat dilihat Gambar 3 *section 1* merupakan bagian wilayah diantara *recloser* Darul Arqom dengan SSO Sudirman, untuk *section 2* merupakan wilayah bagian diantara SSO Sudirman dengan SSO Maleer sekaligus pembatas wilayah kerja ULP Garut Kota dengan ULP Leles.

Wilayah gardu distribusi *section 1* dengan jumlah pelanggan 6.151 dari 20 gardu distribusi. Wilayah *section 1* ini, dapat dilihat pada Gambar 3 untuk *section 1* merupakan wilayah antara *recloser* Darul Arqom dengan SSO Sudirman dan juga 1 buah FCO yaitu percabangan Tegal Kurdi. Pada *section 2* ini terdapat 21 gardu distribusi dengan jumlah pelanggan 6.638. Pada Gambar 4 untuk *section 2* ini terdapat 3 buah 3 buah FCO percabangan dengan yang mana wilayah *section 2* ini diantara SSO Sudirman dengan SSO Maleer, yang mana SSO MALEER ini merupakan pembatas antara wilayah kerja ULP Garut Kota dengan ULP Leles.

3.2. Indeks Keandalan Komponen

Indeks kegagalan pada peralatan pendistribusian tenaga listrik yang ditetapkan SPLN N0.59 : 1985 meliputi data kegagalan pada saluran udara dan kegagalan pada peralatan distribusi. Berikut tabel indeks kegagalan pada peralatan yang ditetapkan oleh SPLN No.59 : 1985.

Tabel 1. Indeks Keandalan Saluran Udara.

Variabel	Nilai
<i>Sustained failure rate</i> ($\lambda/km/yr$)	0,2
<i>r</i> (<i>repair time</i>) (<i>Hours</i>)	10
<i>rs</i> (<i>switching time</i>) (<i>hours</i>)	0,16

Perhitungan L3(RECDA-K)

$$\begin{aligned} \lambda_i &= (\lambda_L + \text{Momentary}) \times \text{Panjang Saluran} \\ &= (0,2 + 0,003) \times 1,2 \\ &= 0,2436 \end{aligned}$$

Tabel 2. Hasil Perhitungan Frekuensi *Section 1*.

Peralatan	$\lambda(\text{fault/year})$	<i>Repair Time</i> (<i>hours</i>)	U(<i>hours/year</i>)
CB	0,004	-	0,004
TD (19 TD)	$0,005 \times 19$	-	0,095
<i>Recloser</i>	0,005	-	0,005
L1 (TRAFO GI-TMGS)	0,2	2,3	0,4669
L2 (TRAFO GI- RECDA)	0,2	3,1	0,6293
L3 (RECDA-K)	0,2	1,2	0,2436
L4 (K-GMTK)	0,2	1,9	0,3857
L5 (GMTK-GMT)	0,2	0,9	0,1827
L6 (GMT-KNHK)	0,2	1,6	0,3248
L7 (KNHK-GGCK)	0,2	1,7	0,3451
L8 (GGCK-SGI)	0,2	2,1	0,4263
L9 (KNHK-RSAK)	0,2	1,1	0,2233
L10 (RSAK-SDRM)	0,2	0,6	0,1218
L11 (SDRM-BSPI)	0,2	1,3	0,2639
L12 (BSPI-PSDK)	0,2	1,4	0,2842
L13 (PSDK-PBSK)	0,2	0,6	0,1218
L14 (PSDK-BMTK)	0,2	1,1	0,2233
L15 (BMTK-TGDK)	0,2	1,2	0,2436
L16 (TGDK-TGKR)	0,2	0,9	0,1827
L17 (TGKR-TGKK)	0,2	1,7	0,3451
L18 (TGKK-BT)	0,2	1,1	0,2233
L19 (TGKK-EE)	0,2	1	0,203
L20 (PBSK-POMC)	0,2	1,3	0,2639
L21 (POMC-POMK)	0,2	0,8	0,1624
L22 (POMK-SS0)	0,2	1,9	0,3857

Tabel 3. Hasil Perhitungan Frekuensi *Section 2*.

Peralatan	Failure Rate Peralatan	Panjang Saluran (km)	$\lambda(\text{fault/year})$
SS0	0,003	-	0,003
TD (21 TD)	$0,005 \times 1$	-	0,105
L23 (SSO-PDGC)	0,2	1,4	0,2842
L24 (PDGC-PGRK)	0,2	1,6	0,3248
L25 (PGRK-MDLR)	0,2	1,4	0,5481
L26 (MDLR-MALK)	0,2	1,3	0,0609
L27 (PGRK-COPK)	0,2	2,7	0,2842
L28 (COPK-COPT)	0,2	0,9	0,1827
L28 (COPT-COP)	0,2	2,6	0,0812
L29 (COPT-MDLK)	0,2	0,4	0,5278
L30 (MDLK-HNIA)	0,2	1	0,203
L31 (COP-WBCK)	0,2	2,9	0,1218
L32 (COP-PPKG)	0,2	1,6	0,5887
L33 (PPKG-RBLK)	0,2	1,4	0,2842
L34 (WBCK-TMSK)	0,2	2	0,406
L35 (TMSK-PAPK)	0,2	0,6	0,1218
L36 (PAPK-PCTA)	0,2	1,3	0,2639
L37 (PCTA-LBS STM)	0,2	0,4	0,0812
LBS	0,003	-	0,003
L38 (LBS-PSM)	0,2	1	0,203
L39 (PSM-DAM)	0,2	1,1	0,2233
L40 (DAM-DAMK)	0,2	0,8	0,1827
L41 (PSM-PSMS)	0,2	1,4	0,0812
L42 (PSM-LBS STM)	0,2	1,6	0,3248
L43 (PSM-SSOMALEER)	0,2	0,9	0,3654
L44 (PCTA-LBS SMSAT)	0,2	1,9	0,3857

1) Perhitungan Durasi Kegagalan (U)

Berikut perhitungan durasi kegagalan pada CB dan saluran L1(TRAFO GI-TMGS), L2 (TRAFO G1-K), untuk hasil perhitungan selanjutnya ditampilkan pada Tabel 4.4. Hasil dari perhitungan frekuensi dari *section 1* dan *section 2* dimasukkan untuk mencari durasi dari setiap komponennya menggunakan persamaan (4). Yaitu frekuensi dari setiap peralatannya dikalikan dengan waktu perbaikan yang telah ditetapkan oleh SPLN No.59 : 1985.

Perhitungan CB

$$\begin{aligned}
 U &= \lambda i . \text{repair time} \\
 &= 0,004 . 10 \\
 &= 0,04
 \end{aligned}$$

Perhitungan L1(TRAFO GI-TMGS)

$$\begin{aligned}
 U &= \lambda i . \text{repair time} \\
 &= 0,4669 . 3 \\
 &= 1,4007
 \end{aligned}$$

Perhitungan L2(TRAFO GI-RECDA)

$$\begin{aligned}
 U &= \lambda i . \text{repair time} \\
 &= 0,6293 . 3 \\
 &= 1,8879
 \end{aligned}$$

Tabel 4. Hasil Perhitungan Durasi *Section 1*.

Peralatan	$\lambda(\text{fault/year})$	Repair Time (hours)	U(hours/year)
CB	0,004	10	0,04
TD (19 TD)	0,095	10	0,95
Recloser	0,005	10	0,05
L1 (TRAFO GI-TMGS)	0,4669	3	1,4007
L2 (TRAFO GI- RECDA)	0,6293	3	1,8879
L3 (RECDA-K)	0,2436	3	0,7308
L4 (K-GMTK)	0,3857	3	1,1571
L5 (GMTK-GMT)	0,1827	3	0,5481
L6 (GMT-KNHNK)	0,3248	3	0,9744
L7 (KNHNK-GGCK)	0,3451	3	1,0353
L8 (GGCK-SGI)	0,4263	3	1,2789
L9 (KNHNK-RSAK)	0,2233	3	0,6699
L10 (RSAK-SDRM)	0,1218	3	0,3654
L11 (SDRM-BSPI)	0,2639	3	0,7917
L12 (BSPI-PSDK)	0,2842	3	0,8526
L13 (PSDK-PBSK)	0,1218	3	0,3654
L14 (PSDK-BMTK)	0,2233	3	0,6699
L15 (BMTK-TGDK)	0,2436	3	0,7308
L16 (TGDK-TGKR)	0,1827	3	0,5481
L17 (TGKR-TGKK)	0,3451	3	1,0353
L18 (TGKK-BT)	0,2233	3	0,6699
L19 (TGKK-EE)	0,203	3	0,609
L20 (PBSK-POMC)	0,2639	3	0,7917
L21 (POMC-POMK)	0,1624	3	0,4872
L22 (POMK-SS0)	0,3857	3	1,1571
CB	0,004	10	0,04

Tabel 5. Hasil Perhitungan Durasi *Section 2*.

Peralatan	$\lambda(\text{fault/year})$	Repair Time (hours)	U(hours/year)
SS0	0,003	10	0,03
TD (21 TD)	0,105	10	1,05
L23 (SSO-PDGC)	0,2842	3	0,8526
L24 (PDGC-PGRK)	0,3248	3	0,9744
L25 (PGRK-MDLR)	0,5481	3	0,8526
L26 (MDLR-MALK)	0,0609	3	0,7917
L27 (PGRK-COPK)	0,2842	3	1,6443
L28 (COPK-COPT)	0,1827	3	0,5481
L28 (COPT-COP)	0,0812	3	1,5834
L29 (COPT-MDLK)	0,5278	3	0,2436
L30 (MDLK-HNIA)	0,203	3	0,609
L31 (COP-WBCK)	0,1218	3	1,7661
L32 (COP-PPKG)	0,5887	3	0,9744
L33 (PPKG-RBLK)	0,2842	3	0,8526
L34 (WBCK-TMSK)	0,406	3	1,218
L35 (TMSK-PAPK)	0,1218	3	0,3654
L36 (PAPK-PCTA)	0,2639	3	0,7917
L37 (PCTA-LBS STM)	0,0812	3	0,2436
LBS	0,003	10	0,03
L38 (LBS-PSM)	0,203	3	0,609
L39 (PSM-DAM)	0,2233	3	0,6699
L40 (DAM-DAMK)	0,1827	3	0,4872
L41 (PSM-PSMS)	0,0812	3	0,8526
L42 (PSM-LBS STM)	0,3248	3	0,9744
L43 (PSM-SSOMALEER)	0,3654	3	0,5481
L44 (PCTA-LBS SMSAT)	0,3857	3	1,1571

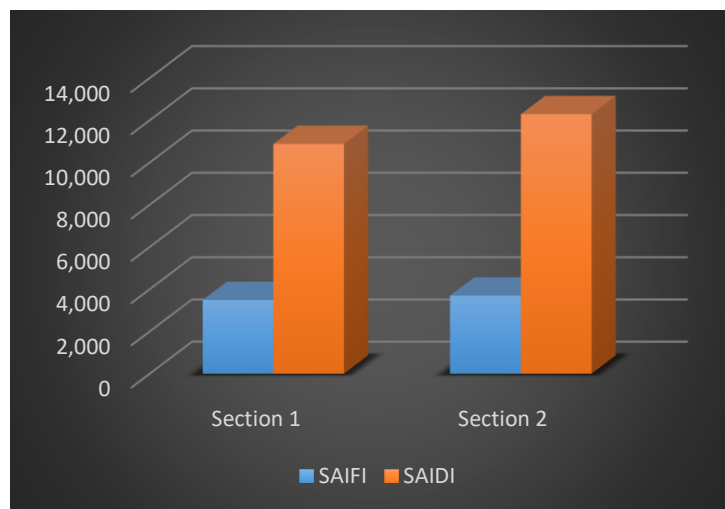
3.3. Perhitungan SAIFI dan SAIDI

1) Perhitungan indeks keandalan *section 1* pada penyulang Suci

$$\begin{aligned}
 SAIFI &= \frac{\Sigma (\lambda_{section\ 1} \cdot N_{section\ 1})}{\Sigma N_{Penyulang\ Suci}} \\
 &= \frac{7,3564 \cdot 6151}{12789} \\
 &= 3,5381 \text{ Kali/Pelanggan/Tahun} \\
 SAIDI &= \frac{\Sigma (U_{section\ 1} \cdot N_{section\ 1})}{\Sigma N_{Penyulang\ Suci}} \\
 &= \frac{22,7972 \cdot 6151}{12789} \\
 &= 10,9645 \text{ Jam/Pelanggan/Tahun}
 \end{aligned}$$

2) Perhitungan indeks keandalan *section 2* pada penyulang Suci

$$\begin{aligned}
 SAIFI &= \frac{\Sigma (\lambda_{section\ 2} \cdot N_{section\ 2})}{\Sigma N_{Penyulang\ Suci}} \\
 &= \frac{7,2416 \cdot 6638}{12789} \\
 &= 3,7586 \text{ Kali/Pelanggan/Tahun} \\
 SAIDI &= \frac{\Sigma (U_{section\ 2} \cdot N_{section\ 2})}{\Sigma N_{Penyulang\ Suci}} \\
 &= \frac{24,7189 \cdot 6638}{12789} \\
 &= 12,8300 \text{ Jam/Pelanggan/Tahun}
 \end{aligned}$$



Gambar 4. Grafik Hasil Analisis Matematis.

Tabel 6. Rekapitulasi Indeks Keandalan Setiap *Section*.

No	Penyulang Suci	Indeks Keandalan	
		SAIFI	SAIDI
1	<i>Section 1</i>	3,5381	10,9645
2	<i>Section 2</i>	3,7586	12,8300
	Total	7,2967	23,7945

Dapat dilihat dari Gambar 4 dan Tabel 6 bahwa penyulang Suci *section 1* dan *section 2* memiliki SAIFI yang kurang andal, yang mana masing-masing melebihi batas 3,3 kali/pelanggan/tahun, setelah digabungkan kedua *section* tersebut memiliki SAIFI dan SAIDI yang kurang andal juga. Berikut Penyesuaian indeks keandalan penyulang Suci dengan SPLN 68-2:1986.

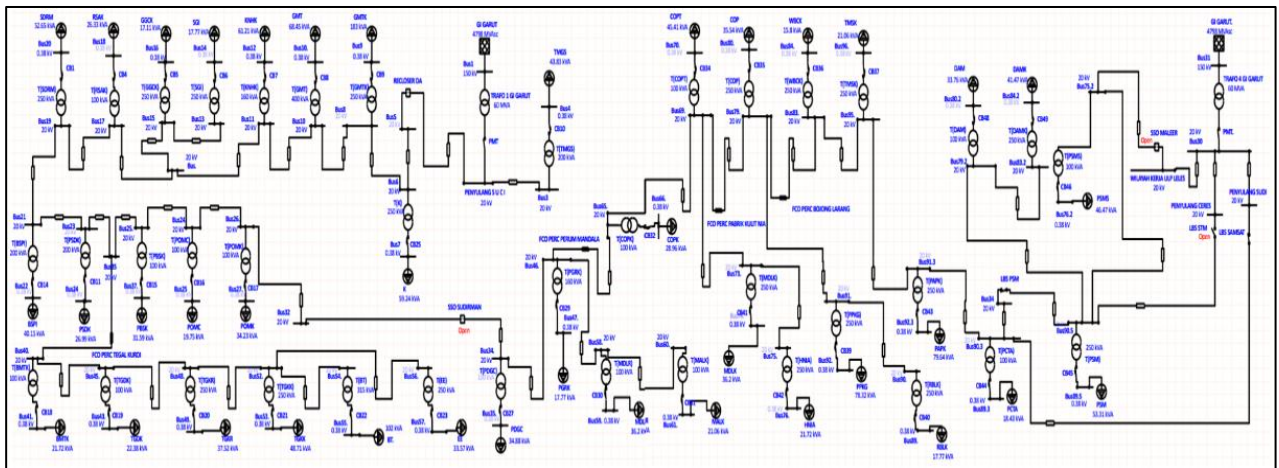
Tabel 7. Penyesuaian dengan SPLN.

Penyulang Suci		SPLN 68 - 2 : 1986	
SAIFI	SAIDI	SAIFI (3,3 k/p/t)	SAIDI (21,9 j/p/t)
7,2967	23,7945	×	×

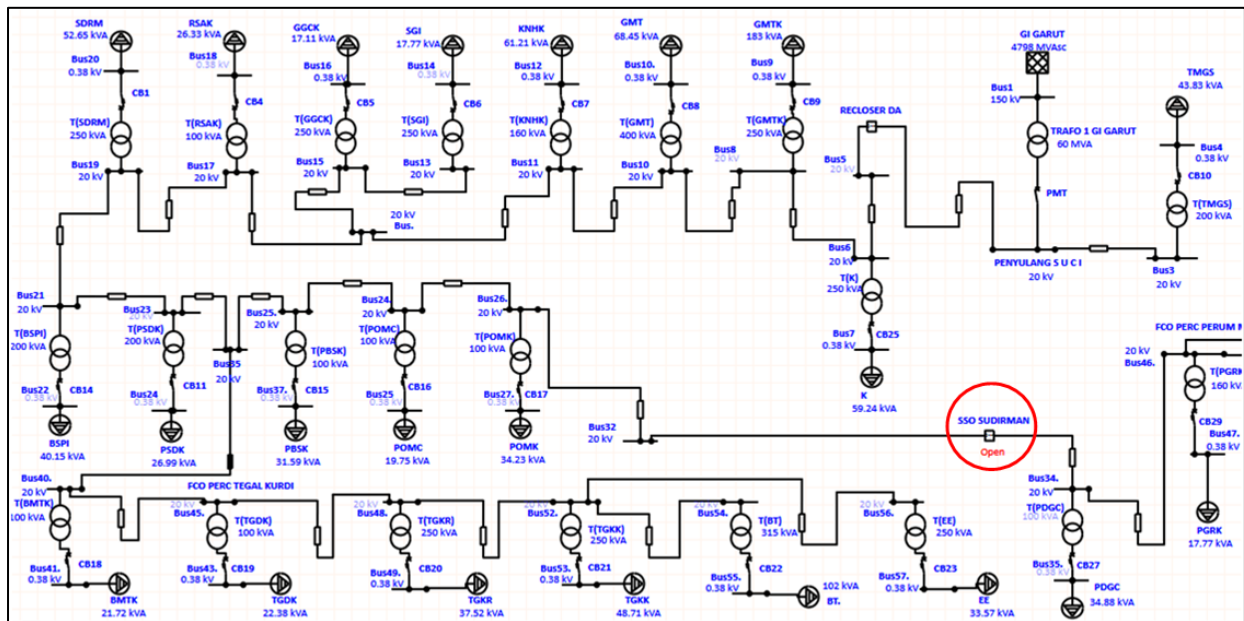
Tabel 7 merupakan hasil akhir dari analisis indeks keandalan penyulang Suci menggunakan metode RIA-*section technique*, bahwa penyulang Suci belum sesuai indeks keandalan dengan SAIFI dan SAIDI melebihi batas standar yang telah ditetapkan, maka dari itu diperlukan simulasi menggunakan ETAP, guna untuk menemukan suatu solusi dan juga bisa menjadi sebuah usulan dengan penerapan di masa mendatang.

3.4. Pemodelan Sistem dengan Software ETAP

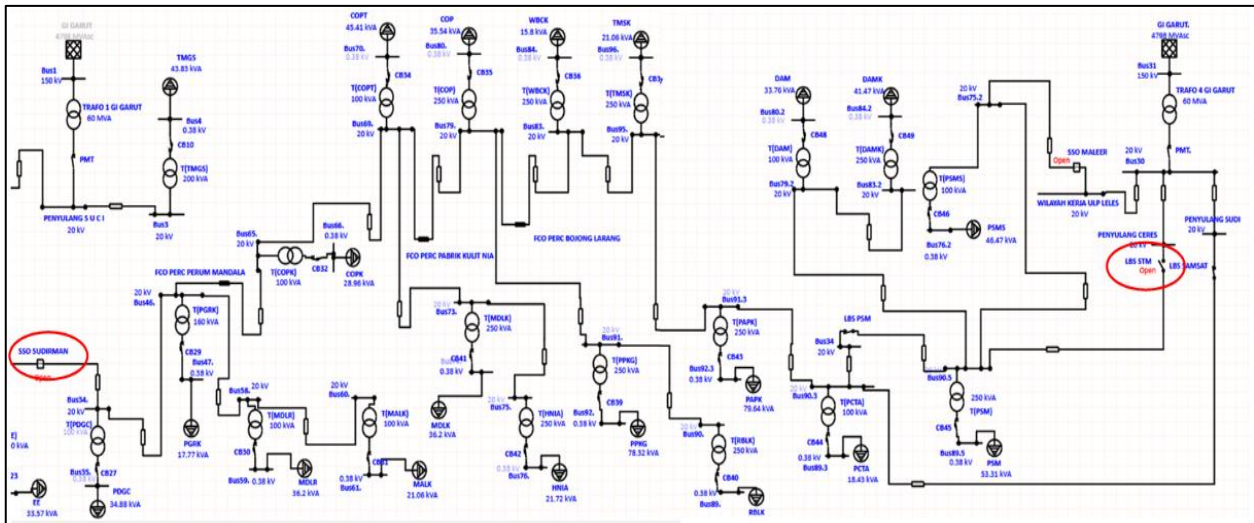
Simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk menemukan solusi untuk menurunkan indeks keandalan dan memenuhi kriteria tertentu. Berikut pemodelan SLD penyulang Suci pada *software* ETAP.



Gambar 5. Pemodelan Single Line Diagram.



Gambar 6. Pemodelan Single Line Diagram Section 1.



Gambar 7 Pemodelan *single line diagram section 2*

3.5. Analisis Indeks Keandalan Menggunakan Software ETAP 19.0.1

Analisis Indeks Keandalan Menggunakan Software ETAP 19.0, dengan melakukan 2 kali simulasi yaitu sebelum dan sesudah perbaikan. Untuk yang sebelum perbaikan, guna untuk menyesuaikan terlebih dahulu dengan hasil perhitungan matematis (Nanzain et al., 2017). Berikut hasil simulasi sebelum perbaikan:

Tabel 8. Hasil Simulasi ETAP Sebelum Perbaikan.

No	Penyulang Suci	Indeks Keandalan	
		SAIFI	SAIDI
1	<i>Section 1</i>	3,8069	12,4290
2	<i>Section 2</i>	3,7383	11,2398
	Total	7,5452	23,6688

Tabel 9. Penyesuaian dengan SPLN.

Penyulang Suci		SPLN 68 – 2 : 1986	
SAIFI	SAIDI	SAIFI (3,3 k/p/t)	SAIDI (21,9 j/p/t)
7,5452	23,6688	×	×

Berikut tabel perbandingan antara hasil perhitungan matematis dengan simulasi ETAP sebelum perbaikan:

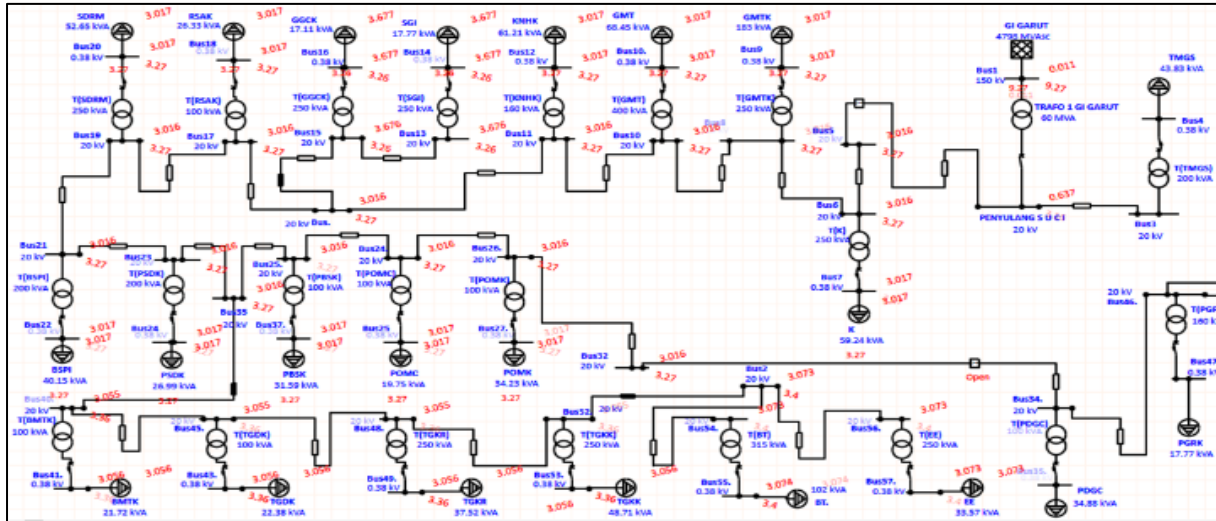
Tabel 10. Perbandingan Hasil Matematis Dan Simulasi.

Metode RIA-Section Technique		SPLN 68 – 2 : 1986	
		SAIFI	SAIDI
SAIFI	SAIDI	×	×
7,2967	23,7945		
Simulasi Software ETAP		SPLN 68 – 2 : 1986	
		SAIFI	SAIDI
SAIFI	SAIDI	×	×
7,5452	23,6688		

3.6. Perbaikan Indeks Keandalan Penyulang Suci

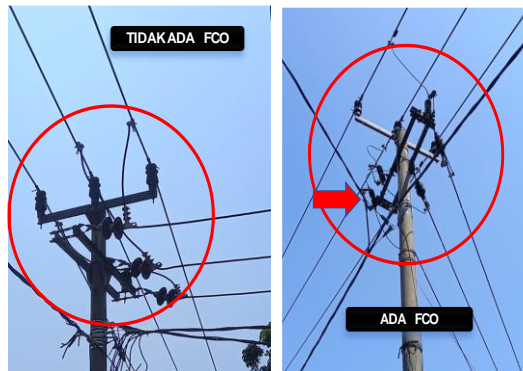
1) Perbaikan *Section 1*

Pemodelan setelah perbaikan pada penyulang Suci *section 1*, setelah transformator distribusi KNHK dan sebelum transformator distribusi SGI dan GGCK dipasang 1 buah FCO yang diberi nama FCO Garut Griya Central Kulit dan 1 buah FCO dipasang setelah transformator distribusi TGKK Pemasangan FCO sesuai standar PLN D3.026 :2017 dengan tegangan pengenal 24 kV, arus pengenal 100 A dan frekuensi 50 hz, maka dengan penambahan FCO ini akan lebih memproteksi transformator distribusi pada penyulang Suci *section 1*.



Gambar 8. Perbaikan Section 1.

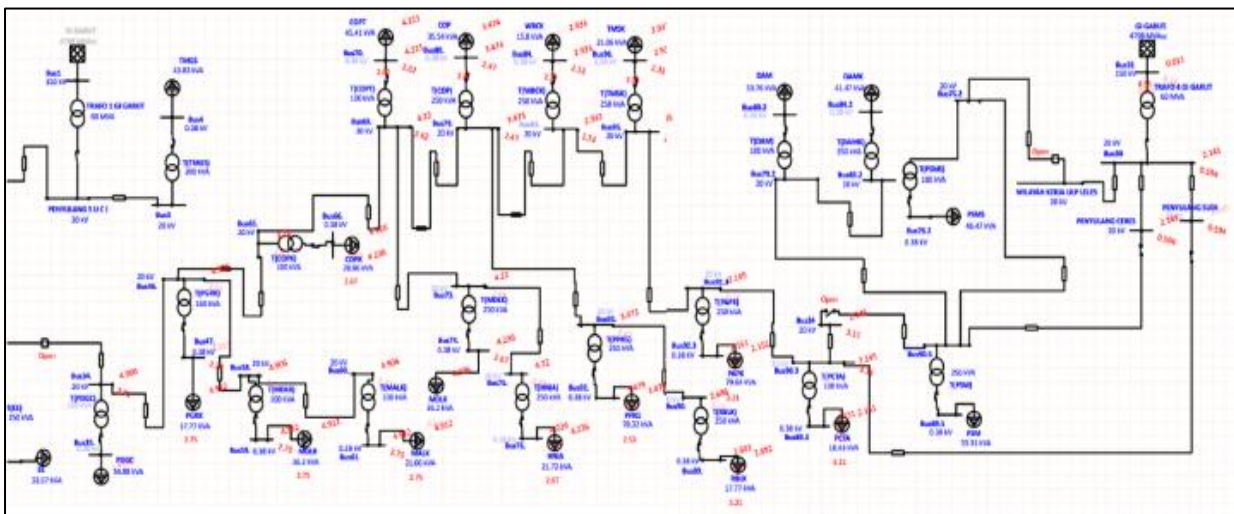
Berikut untuk penerapannya ketika di lapangan:



Gambar 9. Penerapan Di Lapangan Section 1.

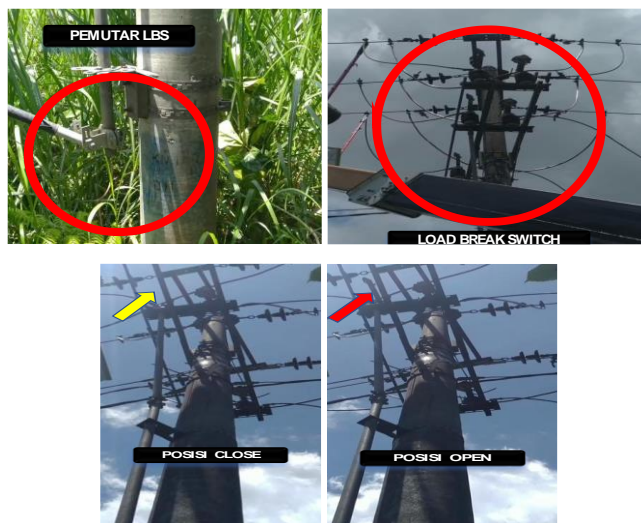
2) Perbaikan Section 2

Pemodelan section 2 setelah perbaikan, yaitu dengan melakukan pemindahan beberapa transformator distribusi kepada penyulang lain. Dengan membuka LBS (Load Break Switch) PSM. Dengan membuka LBS PSM ini ada 4 buah transformator distribusi yang terpisah dari penyulang Suci, yaitu DAM, DAMK, PSM dan PSMS. Dengan dilakukan ini dapat mengurangi beban yang diproteksi serta mengurangi jarak jauh penyulang.



Gambar 10. Perbaikan Section 2.

Berikut untuk penerapannya ketika di lapangan:



Gambar 11. Penerapan di Lapangan Section 2.

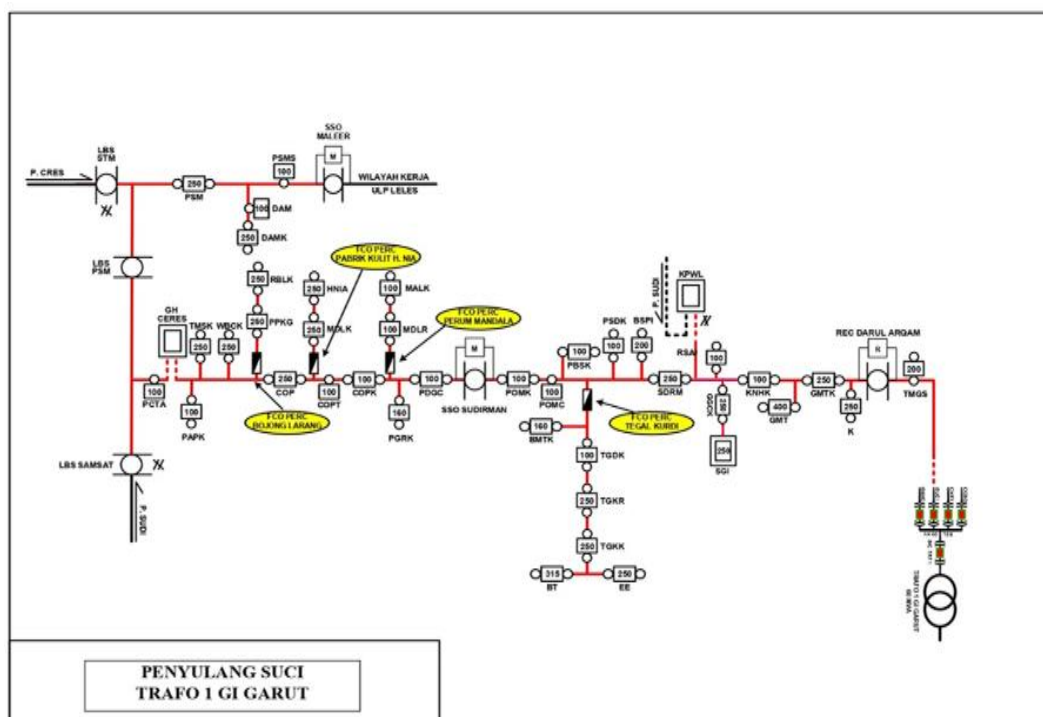
Tabel 11. Perbandingan Sebelum Dan Sesudah Perbaikan.

No	Penyulang Suci	Sebelum Perbaikan		Sesudah Perbaikan	
		SAIFI	SAIDI	SAIFI	SAIDI
1	Section 1	3,4943	10,8832	3,0867	10,1526
2	Section 2	3,7028	12,2917	3,1274	10,0278
	Total	7,1971	23,1749	6,2141	20,1804

Tabel 12. Penyesuaian dengan SPLN Setelah Perbaikan.

Penyulang Suci		SPLN 68 - 2 : 1986	
SAIFI	SAIDI	SAIFI (3,3 k/p/t)	SAIDI (21,9 j/p/t)
6,2141	20,1804	×	✓

3.7. Perbaikan Solusi Ke 2 Penyulang Suci



Gambar 12. Perbaikan Solusi 2 Penyulang Suci.

Solusi yang kedua yaitu dengan membuka SSO dalam keadaan normal dan menutup LBS samsat serta membuka LBS STM, yang mana untuk *section 2* mendapatkan aliran listrik dari penyulang Sudirman yang melewati gardu hubung terlebih dahulu sebelum mengalir ke *section 2*. Itu secara otomatis penyulang Suci menjadi 2 bagian, yaitu bagian penyulang suci timur dan penyulang suci barat.

Tabel 13. Hasil Perbaikan Solusi 2 Penyulang Suci.

No	Penyulang Suci	Sesudah Perbaikan	
		SAIFI	SAIDI
1	Barat	3,0867	10,1526
2	Timur	3,1274	10,0278

Tabel 14. Penyesuaian SPLN Perbaikan Solusi 2.

SPLN 68 - 2 : 1986	
SAIFI (3,3 k/p/t)	SAIDI (21,9 j/p/t)
✓	✓

Maka dari itu ketika menggunakan solusi yang kedua akan mendapat SAIDI dan SAIFI yang sesuai dengan SPLN 68-2:1986, yang mana menurut SPLN 68-2:1986 3,3 kali/pelanggan/tahun untuk SAIFI dan 21,9 jam/pelanggan/tahun.

Kesimpulan

Indeks keandalan yang digunakan pada penelitian ini memakai 2 indikator penting dalam menentukan suatu nilai indeks keandalan yaitu SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dan SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*). Dalam menentukan nilai indeks keandalan sistem pendistribusian listrik penyulang Suci ULP Garut Kota ini dilakukan perhitungan secara matematis menggunakan metode RIA-*section technique* dengan rumus yang telah ditentukan serta disimulasikan menggunakan *software ETAP* dengan *study case reliability assessment*. Berdasarkan hasil penelitian ini dilakukan suatu perbaikan agar nilai keandalan penyulang stabil. Perbaikan dilakukan 2 kali, untuk perbaikan yang pertama dipasang 2 buah *Fuse cut out* dan memindahkan 4 buah transformator, sedangkan perbaikan kedua ialah membagi penyulang Suci menjadi 2 bagian, yaitu penyulang Suci barat dan penyulang Suci timur. Maka dengan melakukan perbaikan tersebut indeks keandalan pada penyulang Suci menjadi stabil dan memenuhi apa yang telah ditetapkan oleh SPLN 68-2:1986 yaitu di bawah SAIFI 3,3 kali/pelanggan/ tahun dan SAIDI 21,9 jam/ pelanggan/ tahun dimana sebelumnya nilai SAIFI 3,8 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI 12,42 j/p/t menjadi SAIDI 3,08 dan SAIDI 20,18 j/t/p.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih PT. PLN (Persero) ULP Garut Kota atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini.

Daftar Notasi

- λ = Indeks gangguan rata – rata / tahun
- Ni = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan
- N = Total jumlah pelanggan yang dilayani
- U = Durasi gangguan rata- rata per tahun
- Ni = Jumlah pelanggan yang mengalami gangguan
- N = Total jumlah pelanggan yang dilayani
- λ_i = Frekuensi kegagalan
- λ_L = Sustained failure rate [λ /km/yr]
- Momentary = 0,003
- U = Durasi kegagalan
- λ_i = Frekuensi kegagalan
- repair time = waktu perbaikan No.59 : 1985

Daftar Pustaka

- Budi, G. P., Gandi, A., Keandalan, A., Distribusi..., S., Putu, G., Arigandi, B., Hartati, R. S., & Weking, A. I. (2015). ANALISA KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI PENYULANG KAMPUS DENGAN MENGGUNAKAN PENGABUNGAN METODE SECTION TECKNIQUE DAN RIA. Dalam *Teknologi Elektro* (Vol. 14, Nomor 2).

- Fatoni, A., Seto Wibowo, R., Soeprijanto, A., & Elektro, J. T. (2016). Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20 kV PT.PLN Rayon Lumajang dengan Metode FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). *JURNAL TEKNIK ITS*, 5(2).
- Hidayatullah, R. (2017). *Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20KV Menggunakan Metode Section Technique dan Ria-Section Technique pada Penyulang Adi Sucipto Pekanbaru*.
- Kusuma, W., Joto, R., & Mieftah, M. (2022). *Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20kV Pada Penyulang Pujon PT. PLN (PERSERO) ULP Batu*.
- Laboratory, S. (t.t.). *Etap Online*. <http://stdelaboratory.blogspot.co.id/2013/11/tentang-etap-electric-transient-and.html>
- Luthfiyani, U. K., Setiawan, A., & Arifin, S. (2023). INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi Analisis Perbandingan Indeks Keandalan Sistem Jaringan Distribusi dengan Metode Section Technique dan Reliability Index Assessment (RIA): Studi Kasus Gardu Induk Balaraja. *Media Cetak*, 2(1), 250–264. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i1.1782>
- Maliky, A. T., & Haryudo, S. I. (2020). *Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Pada Penyulang Pejangkungan Dengan Metode RIA*. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/30122>
- PRAYOGI, A. A. (2021). Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV pada Penyulang Selapan Jaya dan Penyulang Jahe di PLTBg PT. Sampoerna Agro. *JURNAL SURYA ENERGY*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.32502/jse.v6i1.3105>
- Putri Hesti, L., & Nugraha, A. E. (2023). *Analisis Komponen Kritis Mesin Bubut Underfloor Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis dan Fault Tree Analysis*. VIII(3).
- Sanaky, M. R., Sulistiawati, B., Pembimbing, D., & Nurcahyo, I. E. (t.t.). *Peningkatan Indeks Keandalan dengan Penambahan Recloser pada Sistem Distribusi di PLTD Subaim Menggunakan Metode Section Technique*.

Validasi Optimasi Kekasaran Permukaan dan Keausan Tepi Pahat Proses Bubut Menggunakan Metode Taguchi dengan Data Tunggal

Ervin Dwi Saputro¹, Sigit Yoewono Martowibowo², dan Gagan Ganjar Tabah²

¹PT. PLN Indonesia Power UPDK Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

²Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

ervin.dwi@plnindonesiapower.co.id, sigit.yoewono@lecture.unjani.ac.id, gagan.ganjar@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Untuk mendapatkan nilai terbaik, metode Taguchi menggunakan analisis *signal-to-noise* (S/N), yang memerlukan pengumpulan data berulang untuk berbagai faktor kontrol. Namun, dalam praktik, metode Taguchi masih gagal memenuhi gagasan bahwa pengumpulan data hanya dilakukan satu kali saja. Ada pilihan analisis standar yang tidak memerlukan pengumpulan data berulang. Dalam kasus pengumpulan data tunggal, penelitian ini menyelidiki validasi metode Taguchi dengan membandingkan hasil eksperimen validasi dan analisis standar dengan hasil optimasi. Empat parameter perbandingan, yaitu kombinasi faktor kontrol, prediksi nilai optimum, penyimpangan dari nilai prediksi optimum, dan peringkat pengaruh faktor kontrol digunakan untuk menentukan validitas. Data studi kasus proses bubut dan permesinan bubut digunakan dalam penelitian ini. Dari penelitian ini, diperoleh kesimpulan bahwa metode Taguchi untuk optimasi dengan pengambilan data tunggal adalah valid.

Kata kunci: Optimasi, Metode Taguchi, Analisis S/N, Analisis standar, Proses bubut

Abstract

The Taguchi method uses signal-to-noise ratio (S/N) analysis to obtain optimal values and requires repeated data collection combined with control factors. However, in practice, the Taguchi method is still not in accordance with this concept, even though there are standard analysis options that do not require repeated data collection. In this study, a validation study of the Taguchi method was conducted for the case of a single data collection by comparing the optimization results obtained against standard analysis and validation experiment results. Determination of validity is carried out based on four comparison parameters, namely the combination of control factors, prediction of optimum value, deviation of optimum value prediction, and ranking of control factor influence. This research was conducted using a turning process case study. From this research, it is concluded that the Taguchi method for optimization of a single data collection is valid.

Keywords: Optimization, Taguchi method, S/N analysis, Standard analysis, Turning processes

1. Pendahuluan

Optimasi adalah suatu proses untuk mendapatkan kondisi yang memberikan nilai minimum, maksimum, atau nilai target dari suatu fungsi (Rao, 2009). Salah satu metode optimasi adalah metode Taguchi yang dikembangkan oleh Genichi Taguchi. Ciri utama optimasi metode Taguchi adalah menghasilkan nilai optimum yang bersifat kokoh (*robust*), yaitu tangguh terhadap variasi gangguan/*noise* (Taguchi dkk., 2005).

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengoptimasi parameter proses bubut yang mempengaruhi kekasaran permukaan, gaya potong, dan masa pakai pahat dengan menggunakan metode Taguchi (Thirumalai dkk., 2013); (Lan dkk., 2018); (Singh & Sultan, 2019); (Patel dkk., 2021). Metode Taguchi juga telah diaplikasikan dalam optimasi parameter proses gudi yang mempengaruhi permukaan akhir dan akurasi dimensi (Aamir dkk., 2020). Banyak peneliti juga telah mengadopsi metode Taguchi untuk meneliti efek dari proses freis terhadap kekasaran permukaan yang optimal dan dimensi produk (Jenarthanan & Jeyapaul, 2013); (Ribeiro dkk., 2017); (Sulaiman et al., 2022). Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan temuan yang memuaskan tentang cara menemukan kombinasi parameter proses yang ideal. Martowibowo dan Wahyudi (Martowibowo & Wahyudi, 2012) berhasil menerapkan metode Taguchi untuk mengoptimalkan proses *wire* EDM untuk pemotongan tirus pada baja ASSAB 760. Ini menghasilkan kecepatan penghasilan geram yang paling tinggi dan kekasaran permukaan yang paling rendah. Somani dkk. (Somani dkk., 2021) menggunakan metode Taguchi untuk mengetahui bagaimana parameter-parameter proses EDM (*arus listrik*, *pulse on time*, dan *pulse off time*) memengaruhi kecepatan penghasilan geram, kekasaran permukaan, dan kecepatan keausan pahat untuk benda kerja baja D2.

Dalam penggunaannya, metode Taguchi mensyaratkan pengambilan data yang berulang untuk mendapatkan sifat

Info Makalah:

Dikirim : 03-05-24;

Revisi 1 : 04-19-24;

Diterima : 04-22-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-811-200-796

e-mail : sigit.yoewono@lecture.unjani.ac.id

kokoh tersebut (Roy, 2010). Dalam penerapannya, masih banyak ditemukan optimasi proses produksi menggunakan metode Taguchi yang hanya berdasarkan pengambilan data tunggal. Sebagai contoh adalah optimasi yang dilakukan pada proses bubut (Bhaduria dkk., 2016); (Manivel & Gandhinathan, 2016). Bhaduria, dkk. melakukan optimasi proses bubut baja 45C8 menggunakan metode Taguchi untuk

menghasilkan kekasaran permukaan yang minimum dengan memvariasikan kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman pemotongan. Manivel dan Gandhinathan melakukan optimasi proses bubut kering material ADI (*Austempered Ductile Iron*) menggunakan metode Taguchi untuk menghasilkan kekasaran permukaan dan keausan pahat yang minimum. Selain penelitian-penelitian tersebut, masih terdapat beberapa penelitian lain yang juga menggunakan metode Taguchi untuk mendapatkan nilai optimum berdasarkan pengambilan data tunggal, diantaranya adalah penelitian yang dilakukan Kaswadi dkk. (Kaswadi dkk., 2015).

Dalam proses bubut ada berbagai permasalahan yang berakibat pada menurunnya kualitas produk akhir seperti kekasaran permukaan. Hal ini dapat disebabkan antara lain oleh pengaturan parameter permesinan. Untuk mendapatkan produk akhir hasil proses bubut yang baik, perlu diperhatikan parameter-parameter yang berpengaruh pada saat proses bubut berlangsung.

Adanya ketidaksesuaian dari pengaturan parameter proses ini akan menyebabkan menurunnya kualitas dari produk akhir yang akan berdampak pada efisiensi produksi. Oleh karena itu, perlu adanya suatu kajian mengenai bagaimana penentuan *setting* parameter proses yang sesuai agar kualitas produk yang dihasilkan dapat memenuhi kriteria yang diharapkan.

Penelitian ini difokuskan pada optimasi menggunakan data tunggal yang dilakukan pada proses bubut. Proses bubut dipilih karena merupakan salah satu proses permesinan yang banyak digunakan pada industri manufaktur, sehingga sangat penting untuk mengetahui metode optimasi yang tepat agar dihasilkan kondisi optimum saat pembubutan. Penelitian ini akan memeriksa validitas metode Taguchi untuk kasus pengambilan data tunggal pada proses bubut dengan membandingkan hasil optimasi yang diperoleh dengan hasil eksperimen validasi dan analisis standar.

2. Penerapan Metode Taguchi

2.1. Data Eksperimen

Data eksperimental yang diperoleh Manivel dan Gandhinathan dalam menghasilkan nilai kekasaran permukaan dan keausan pahat pada permesinan bubut CNC digunakan dalam penelitian ini (Manivel & Gandhinathan, 2016). Serangkaian eksperimen dilakukan pada mesin bubut CNC dalam menentukan pengaruh parameter permesinan putaran spindel (n), gerak makan (f), dan kedalaman pemotongan (a), terhadap respons keluaran kekasaran permukaan (R_a) dan keausan tepi pahat (VB). Benda kerja yang digunakan untuk eksperimen adalah *Austempered Ductile Iron* (ADI) ASTM *grade* 3. Material benda kerja diaustenisasi pada suhu 880°C selama 2 jam. Setelah austenisasi, dilakukan *quenching* terhadap spesimen dalam air garam (50% $NaNO_3$ dan 50% KNO_3) pada suhu 230°C selama 2 jam. Kekuatan tarik 1241 MPa, kekuatan luluh 893 MPa, kekerasan 45 HR_C dan elongasi 4,88% diperoleh setelah perlakuan panas austemper. Ukuran benda kerja adalah diameter 35 mm dan panjang 90 mm. Seluruh eksperimen dilakukan di mesin bubut CNC Galaxy Midas 6 dalam kondisi permesinan kering dan mata potong baru digunakan untuk setiap pengujian (Galaxy Machinery, 2017). Pahat potong yang digunakan adalah karbida sisipan yang dilapisi CVD dari TaeguTec Company. Keausan tepi pahat diukur menggunakan mikroskop Mitutoyo TM 505.

2.2. Analisis Metode Taguchi

Faktor yang dapat dikendalikan (*controllable factors*) dan faktor yang tidak dapat dikendalikan (*uncontrollable factors* atau *noise*) adalah dua jenis faktor yang ada dalam metode Taguchi (Taguchi, 1986). Kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman pemotongan adalah komponen proses bubut yang dapat dikendalikan. Operator mesin bubut dapat mengontrol ketiga faktor ini, yang dikenal sebagai faktor sinyal, karena faktor-faktor ini merupakan faktor dinamik yang dapat mempengaruhi respons. Faktor kontrol perlu ditinjau kembali untuk memaksimalkan kinerja. Karakteristik fungsional produk proses bubut yang menyimpang dari nilai target produksi disebut faktor tak terkendali. Faktor tak terkendali ini terdiri dari dua bagian: faktor tak terkendali luar (eksternal) dan faktor tak terkendali dalam (internal). Faktor tak terkendali luar adalah debu, kinerja operator, material benda kerja, kelembapan, dan temperatur. Faktor tak terkendali dalam adalah umur mesin dan keausan yang terjadi pada mesin bubut.

Metode Taguchi mensyaratkan dilakukannya pengambilan data respons yang berulang dalam satu kombinasi faktor kontrol. Pengolahan data untuk mendapatkan nilai optimum berdasarkan nilai respons yang berulang tersebut menggunakan nilai S/N (Berube & Wu, 2000); (Hutahaean, 2005); (Soejanto, 2009); (Roy, 2010).

Berikut ini persamaan S/N *smaller the better* untuk kekasaran permukaan dan keausan pahat.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

2.3. Konsep Perbandingan Analisis S/N dengan Analisis Standar

Pada perbandingan ini, pernyataan metode Taguchi yang digunakan untuk optimasi pada kasus pengambilan data tunggal adalah valid berdasarkan empat parameter pembanding sebagai berikut (Roy, 2010):

1. Kombinasi faktor kontrol nilai optimum

Kombinasi faktor kontrol hasil optimasi berdasarkan metode Taguchi melalui analisis S/N dibandingkan dengan kombinasi faktor kontrol yang dihasilkan melalui analisis standar. Pada poin ini, metode Taguchi dianggap valid apabila kombinasi faktor kontrol yang dihasilkan oleh analisis S/N adalah sama dengan kombinasi faktor kontrol yang dihasilkan oleh analisis standar. Namun demikian, apabila terdapat perbedaan pada kombinasi tersebut dilakukan analisis berdasarkan nilai rata-rata respons yang dihasilkan oleh setiap level faktor kontrol yang berbeda. Metode Taguchi tetap dianggap valid apabila level faktor kontrol yang menimbulkan perbedaan kombinasi tetap menghasilkan nilai rata-rata respons yang sesuai dengan *quality characteristic* yang telah ditentukan dan rata-rata nilai respons yang dihasilkan oleh level faktor kontrol yang berbeda tersebut memiliki perbedaan kurang dari 10%.

2. Prediksi nilai optimum analisis S/N identik dengan analisis standar

Setelah kombinasi faktor kontrol yang memberikan kondisi optimum sesuai *quality characteristic* diketahui, maka nilai optimum suatu respons dapat diprediksi nilainya. Prediksi nilai respons optimum berdasarkan analisis S/N diperoleh melalui persamaan 2 dan 3, sedangkan prediksi nilai respons optimum berdasarkan analisis standar dapat diperoleh melalui persamaan 4.

Prediksi nilai S/N optimum adalah sebagai berikut.

$$S/N_{opt} = \overline{T_{S/N}} + \sum_{i=1}^n (\overline{CF}_i - \overline{T_{S/N}}) \quad (2)$$

Prediksi nilai respons analisis S/N adalah sebagai berikut.

$$y_{opt S/N} = \left(10^{-\frac{S}{N_{opt}}/10} \right)^{0.5} \quad (3)$$

Prediksi nilai respons analisis standar adalah sebagai berikut.

$$y_{opt std} = \bar{T} + \sum_{i=1}^n (\overline{CF}_i - \bar{T}) \quad (4)$$

Pada poin ini, metode Taguchi dianggap valid apabila prediksi nilai respons optimum hasil analisis S/N menunjukkan nilai yang identik dengan prediksi nilai optimum hasil analisis standar yang dianggap valid untuk kasus pengambilan data tunggal. Indikasi nilai yang identik tersebut adalah perbedaan prediksi nilai optimum antara kedua metode kurang dari 10% yang dapat dihitung melalui persamaan 5 berikut ini.

$$\Delta_{opt} = \frac{y_{opt S/N} - y_{opt std}}{y_{opt std}} \times 100\% \quad (5)$$

Apabila perbedaan yang dihasilkan lebih dari 10%, maka dilakukan analisis terhadap penyimpangan prediksi nilai respons optimum yang dihasilkan kedua analisis terhadap hasil eksperimen validasi sehingga validitas metode Taguchi tetap dapat disimpulkan.

3. Penyimpangan prediksi nilai optimum analisis S/N terhadap hasil eksperimen validasi

Prediksi nilai optimum yang dihasilkan oleh analisis S/N dibandingkan terhadap nilai hasil eksperimen validasi untuk melihat seberapa besar penyimpangan yang terjadi. Nilai penyimpangan tersebut dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\Delta_{val} = \frac{y_{opt S/N} - y_{opt val}}{y_{opt val}} \times 100\% \quad (6)$$

Pada poin ini metode Taguchi dinyatakan valid apabila penyimpangan prediksi nilai optimum hasil analisis S/N terbilang kecil atau kurang dari 10%. Penyimpangan yang kecil mengindikasikan bahwa proses optimasi yang dilakukan mampu memprediksi nilai optimum dengan baik.

4. Peringkat pengaruh faktor kontrol hasil ANOVA (*Analysis of Variance*)

Faktor kontrol dianggap berpengaruh jika nilai F hitung lebih besar daripada F kritis pada tingkat kepercayaan tertentu. Nilai F kritis dapat diperoleh dari tabel statistika yang merupakan fungsi dari jumlah faktor kontrol yang diamati dan jumlah derajat kebebasan total dikurangi jumlah faktor kontrol. Untuk penelitian ini digunakan tingkat kepercayaan sebesar 95%. Pada parameter pembanding ini, metode Taguchi dikatakan valid apabila hasil ANOVA berdasarkan analisis S/N menunjukkan peringkat pengaruh faktor kontrol yang sama dengan ANOVA berdasarkan analisis standar dan hasil *F-test* dari analisis S/N sama dengan analisis standar. Peringkat pengaruh faktor kontrol ditentukan berdasarkan nilai F hitung dan persen kontribusi. Semakin besar nilai F hitung dan persen kontribusi, maka faktor kontrol tersebut semakin berpengaruh terhadap respons yang ditinjau. Apabila terdapat perbedaan peringkat pengaruh faktor kontrol, maka dapat dihitung perbedaan nilai F hitung dan persen kontribusi antara faktor kontrol yang menyebabkan perbedaan peringkat tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

Faktor kontrol yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 1. Radius ujung pahat yang digunakan adalah 0,8 dan 0,4 mm tergantung pada jenis pahat yang biasa digunakan untuk proses bubut. Data eksperimen diperlihatkan pada Tabel 2. Jumlah eksperimen yang dipilih adalah 18 berdasarkan pada matriks ortogonal standar dengan level gabungan, yaitu $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ (Soejanto, 2009).

Tabel 1. Faktor Kontrol.

No.	Notasi	Faktor Kontrol	Level		
			1	2	3
1	r_e	Radius ujung pahat (mm)	0,8	0,4	-
2	v_c	Kecepatan potong (m/min)	50	100	150
3	f	Gerak makan (mm/rev)	0,04	0,08	0,12
4	a	Kedalaman pemotongan (mm)	0,2	0,3	0,4

Tabel 2. Data Eksperimen.

No. Eksperimen	Faktor Kontrol				Kasus I Kekasaran Permukaan R_a (μm)	S/N_{R_a}	Kasus II Keausan Tepi Pahat VB (mm)	S/N_{VB}
	r_e	v_c	f	a				
1	0,8	50	0,04	0,2	0,274	11,245	0,137	17,266
2	0,8	50	0,08	0,3	0,324	9,789	0,124	18,132
3	0,8	50	0,12	0,4	0,438	7,171	0,118	18,562
4	0,8	100	0,04	0,2	0,364	8,778	0,126	17,993
5	0,8	100	0,08	0,3	0,340	9,370	0,110	19,172
6	0,8	100	0,12	0,4	0,508	5,883	0,104	19,659
7	0,8	150	0,04	0,3	0,803	1,906	0,134	17,458
8	0,8	150	0,08	0,4	0,470	6,558	0,132	17,589
9	0,8	150	0,12	0,2	0,704	3,049	0,124	18,132
10	0,4	50	0,04	0,4	0,338	9,422	0,128	17,856
11	0,4	50	0,08	0,2	0,421	7,514	0,125	18,062
12	0,4	50	0,12	0,3	0,709	2,987	0,108	19,332
13	0,4	100	0,04	0,3	0,585	4,657	0,104	19,659
14	0,4	100	0,08	0,4	0,446	7,013	0,112	19,016
15	0,4	100	0,12	0,2	0,614	4,237	0,104	19,659
16	0,4	150	0,04	0,4	0,836	1,556	0,132	17,589
17	0,4	150	0,08	0,2	0,636	3,931	0,135	17,393
18	0,4	150	0,12	0,3	1,106	-0,875	0,116	18,711

Tabel 3 dan 4 memperlihatkan *main effect* ANOM (*Analysis of Mean*) data S/N dan data respons untuk kasus I. Tabel 5 dan 6 memperlihatkan ANOVA data S/N dan data respons untuk kasus I.

Tabel 3. *Main Effect* ANOM Data S/N Kasus I.

Kontrol Faktor	Rata-rata Level 1	Rata-rata Level 2	Rata-rata Level 3	Jangkauan	Peringkat
r_e	7,083	4,494	-	2,590	3
v_c	8,021	6,656	2,687	5,334	1
f	6,261	7,363	3,742	3,621	2
a	6,459	4,639	6,267	1,820	4

Tabel 4. *Main Effect* ANOM Data Respons Kasus I.

Kontrol Faktor	Rata-rata Level 1	Rata-rata Level 2	Rata-rata Level 3	Jangkauan	Peringkat
r_e	0,469	0,632	-	0,163	3
v_c	0,417	0,476	0,759	0,242	1
f	0,533	0,440	0,680	0,240	2
a	0,502	0,645	0,506	0,142	4

Tabel 5. ANOVA Data S/N Kasus I.

Faktor Kontrol	Sq	db	V	F	ρ (%)
r_e	30,177	1	30,177	25,203	16,1
v_c	92,135	2	46,067	38,473	49,1
f	41,341	2	20,670	17,263	22,0
a	11,998	2	5,999	5,010	6,4
error	11,974	10	0,998	1	6,4

Tabel 6. ANOVA Data Respons Kasus I.

Faktor Kontrol	Sq	db	V	F	ρ (%)
r_e	0,119	1	0,119	29,456	14,6
v_c	0,401	2	0,200	49,440	49,1
f	0,176	2	0,088	21,717	21,6
a	0,079	2	0,040	9,734	9,7
error	0,041	10	0,003	1	5,0

Tabel 7 dan 8 memperlihatkan *main effect* ANOM data S/N dan data respons untuk kasus II. Tabel 9 dan 10 memperlihatkan ANOVA data S/N dan data respons untuk kasus II.

Tabel 7. *Main Effect* ANOM Data S/N Kasus II.

Kontrol Faktor	Rata-rata Level 1	Rata-rata Level 2	Rata-rata Level 3	Jangkauan	Peringkat
r_e	18,218	18,586	-	0,368	4
v_c	18,201	19,193	17,812	1,381	1
f	17,970	18,227	19,009	1,039	2
a	18,084	18,744	18,378	0,660	3

Tabel 8. *Main Effect* ANOM Data Respons Kasus II.

Kontrol Faktor	Rata-rata Level 1	Rata-rata Level 2	Rata-rata Level 3	Jangkauan	Peringkat
r_e	0,123	0,118	-	0,005	4
v_c	0,123	0,110	0,129	0,019	1
f	0,127	0,123	0,112	0,015	2
a	0,125	0,116	0,121	0,009	3

Tabel 9. ANOVA Data S/N Kasus II.

Faktor Kontrol	Sq	db	V	F	ρ (%)
r_e	0,610	1	0,610	14,326	5,1
v_c	6,086	2	3,043	71,428	50,9
f	3,515	2	1,758	41,255	29,4
a	1,311	2	0,656	15,389	11,0
error	0,426	10	0,036	1	3,6

Tabel 10. ANOVA Data Respons Kasus II.

Faktor Kontrol	Sq	db	V	F	ρ (%)
r_e	0,00010	1	0,0001	15,318	5,0
v_c	0,00110	2	0,0006	76,619	50,2
f	0,00070	2	0,0003	46,120	30,2
a	0,00030	2	0,0001	17,209	11,3
error	0,00007	10	0,0000	1	3,3

Nilai parameter pembandingan validitas analisis S/N dan analisis standar metode Taguchi diperlihatkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai Parameter Pembanding Validitas Metode Taguchi.

	Kombinasi Faktor Kontrol		Prediksi Nilai Optimum		Hasil Validasi (Penyimpangan Prediksi Nilai Optimum)		Peringkat Pengaruh Faktor Kontrol	
	Analisis S/N	Analisis Standar	Analisis S/N	Analisis Standar	Analisis S/N	Analisis Standar	Analisis S/N	Analisis Standar
Kasus I	$r_e = 0,8$ mm	$r_e = 0,8$ mm	$R_a = 0,264$ μ m	$R_a = 0,176$ μ m	$R_a = 0,194$ μ m ($\Delta_{val} = 36,1\%$)	$R_a = 0,194$ μ m ($\Delta_{val} = 9,28\%$)	1. Kecepatan potong	1. Kecepatan potong
	$v_c = 50$ m/min	$v_c = 50$ m/min					2. Gerak makan	2. Gerak makan
	$f = 0,08$ mm/rev	$f = 0,08$ mm/rev					3. Radius ujung pahat	3. Radius ujung pahat
	$a = 0,2$ mm	$a = 0,2$ mm					4. Kedalaman pemotongan	4. Kedalaman pemotongan
Kasus II	$r_e = 0,4$ mm	$r_e = 0,4$ mm	VB = 0,096 mm	VB = 0,094 mm	VB = 0,095 mm ($\Delta_{val} = 1,05\%$)	VB = 0,095 mm ($\Delta_{val} = 1,05\%$)	1. Kecepatan potong	1. Kecepatan potong
	$v_c = 100$ m/min	$v_c = 100$ m/min					2. Gerak makan	2. Gerak makan
	$f = 0,12$ mm/rev	$f = 0,12$ mm/rev					3. Kedalaman pemotongan	3. Kedalaman pemotongan
	$a = 0,3$ mm	$a = 0,3$ mm					4. Radius ujung pahat	4. Radus ujung pahat

Hasil perbandingan validitas metode Taguchi menggunakan analisis S/N dan analisis standar diperlihatkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Perbandingan Validitas Metode Taguchi.

Konsep Perbandingan	Kombinasi Faktor Kontrol	Prediksi Nilai Optimum	Penyimpangan Prediksi Nilai Optimum	Peringkat Pengaruh Faktor Kontrol
Kasus I	V	X	X	V
Kasus II	V	V	V	V

Keterangan:

V : terpenuhi

X : belum terpenuhi

3.1. Kasus I

Optimasi yang telah dilakukan berdasarkan analisis S/N dan analisis standar menunjukkan terpenuhinya syarat dua parameter pembanding validitas metode Taguchi. Pada Tabel 3 s.d. 6 ditunjukkan bahwa kombinasi faktor kontrol dan peringkat pengaruh faktor kontrol hasil ANOM dan ANOVA dari kedua analisis adalah sama. Level radius ujung pahat pada kombinasi faktor kontrol sesuai dengan Rochim (2007) dan Kalpakjian dan Schmid (2009), bahwa radius pojok pahat yang besar akan menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang baik. *F-test* yang telah dilakukan dengan membandingkan nilai *F* hitung terhadap *F* kritis berdasarkan masing-masing analisis juga menunjukkan kesimpulan yang sama, yaitu keempat faktor kontrol yang diamati adalah berpengaruh terhadap nilai kekasaran permukaan. Kombinasi kontrol faktor yang dihasilkan adalah radius ujung pahat level 1 (0,8 mm), kecepatan potong level 1 (50 m/min), gerak makan level 2 (0,08 mm/rev), dan kedalaman pemotongan level 1 (0,2 mm).

Dua parameter pembanding lainnya tidak memenuhi syarat validitas metode Taguchi. Prediksi nilai optimum yang dihasilkan oleh analisis S/N adalah 0,264 μ m, sedangkan yang dihasilkan oleh analisis standar adalah 0,176 μ m. Penyimpangan prediksi nilai optimum oleh analisis S/N terhadap hasil eksperimen validasi juga cukup besar dan melebihi 10%, yaitu pada nilai 36,1%. Penyimpangan nilai optimum oleh analisis standar terhadap hasil eksperimen validasi sebesar 9,28% (Tabel 11). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada kasus ini, metode Taguchi melalui analisis S/N tidak mampu memprediksi nilai optimum dengan baik. Namun, karena kombinasi faktor kontrol yang diperoleh adalah sama, maka sesungguhnya metode Taguchi melalui analisis S/N sudah mampu menemukan kombinasi faktor kontrol yang menghasilkan nilai kekasaran permukaan minimum sesuai dengan definisi optimasi. Pada kasus ini metode Taguchi dapat dianggap valid untuk optimasi pada pengambilan data tunggal meskipun penyimpangan yang terjadi cukup besar karena perbedaan pengolahan data respons (Tabel 12).

3.2. Kasus II

Pada Tabel 7 s.d. 10 ditunjukkan bahwa pada kasus ini keempat parameter pembandingan memenuhi syarat validitas metode Taguchi untuk pengambilan data tunggal. Kombinasi kontrol faktor yang dihasilkan adalah radius ujung pahat level 2 (0,4 mm), kecepatan potong level 2 (100 m/min), gerak makan level 3 (0,12 mm/rev), dan kedalaman pemotongan level 2 (0,3 mm). Penyimpangan prediksi nilai optimum oleh analisis S/N dan analisis standar terhadap hasil eksperimen validasi cukup kecil, sebesar 1,05% (Tabel 11). Terpenuhinya keempat syarat parameter pembandingan di atas, maka pada kasus ini metode Taguchi untuk kasus pengambilan data tunggal adalah efektif (Tabel 12).

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode Taguchi yang digunakan untuk optimasi pada pengambilan data tunggal proses bubut adalah valid. Analisis data S/N dan data respons memberikan hasil yang sama.

Pada kasus I, kombinasi kontrol faktor yang dihasilkan kedua analisis adalah radius ujung pahat level 1 (0,8 mm), kecepatan potong level 1 (50 m/min), gerak makan level 2 (0,08 mm/rev), dan kedalaman pemotongan level 1 (0,2 mm). Namun prediksi nilai kekasaran permukaan kedua analisis memberikan nilai yang berbeda cukup besar ($\Delta_{opt} = 33,3\%$).

Pada kasus II, kombinasi kontrol faktor yang dihasilkan kedua analisis adalah radius ujung pahat level 2 (0,4 mm), kecepatan potong level 2 (100 m/min), gerak makan level 3 (0,12 mm/rev), dan kedalaman pemotongan level 2 (0,3 mm). Prediksi nilai keausan tepi pahat kedua analisis hanya berbeda 2,1% (Δ_{opt}).

Pada penggunaan metode Taguchi dengan pengambilan data tunggal, eksperimen yang dilakukan tidak membutuhkan pengulangan kombinasi faktor kontrol dan jumlah eksperimen yang banyak, dan mampu memprediksi kombinasi faktor kontrol dan peringkat faktor kontrol dengan baik. Namun, perlu dikaji lebih lanjut jumlah eksperimen yang dibutuhkan agar prediksi nilai optimum mendekati nilai optimum sebenarnya dan penyimpangan prediksi nilai optimum menjadi minimum.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung dan Fakultas Teknologi Manufaktur Universitas Jenderal Achmad Yani, atas dukungannya yang sangat berharga selama penelitian ini.

Daftar Notasi

a	= Kedalaman pemotongan [mm]
\overline{CF}_i	= Nilai rata-rata data respons untuk setiap level faktor kontrol
db	= Derajat kebebasan
f	= Gerak makan [mm/rev]
F	= Rasio varian
n	= Jumlah eksperimen dalam satu baris <i>orthogonal array</i>
r_e	= Radius ujung pahat [mm]
R_a	= Kekasaran permukaan [μm]
S/N	= Rasio sinyal terhadap gangguan
S/N_{opt}	= Rasio sinyal optimum terhadap gangguan
S/N_{Ra}	= Rasio sinyal terhadap gangguan untuk kekasaran permukaan
S/N_{VB}	= Rasio sinyal terhadap gangguan untuk keausan tepi pahat
Sq	= Jumlah kuadrat setiap faktor kontrol
$\overline{T}_{\text{exp}}$	= Nilai rata-rata data respons seluruh eksperimen
$\overline{T}_{S/N}$	= Nilai rata-rata data S/N seluruh eksperimen
y_i	= Nilai respons eksperimen ke i
$y_{opt S/N}$	= Nilai respons analisis S/N
$y_{opt std}$	= Nilai respons analisis standar
v_c	= Kecepatan potong [m/min]
v_f	= Kecepatan pemakanan [mm/s]
V	= Varian
VB	= Keausan tepi pahat
Δ_{opt}	= Perbedaan prediksi nilai optimum antara analisis S/N dan analisis standar
Δ_{val}	= Perbedaan nilai optimum analisis S/N terhadap hasil eksperimen validasi
ρ	= Persentase kontribusi [%]

Singkatan:

ANOM = *Analysis of Mean*

ANOVA = *Analysis of Variance*

DOE = *Design of Experiment*

OA = *Orthogonal Array*

S/N = *Signal-to-Noise ratio*

Daftar Pustaka

- Aamir, M., Tu, S., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., & Vafadar, A. (2020). Optimization and Modeling of Process Parameters in Multi-hole Simultaneous Drilling Using Taguchi Method and Fuzzy Logic Approach. *Materials*, 13(3), 680. <https://doi.org/10.3390/ma13030680>
- Berube, J., & Wu, C. F. J. (2000). Signal-to-Noise Ratio and Related Measures in Parameter Design Optimization: An Overview. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics*, 62(3), 417–432. <https://doi.org/10.2307/25053155>
- Bhaduria, O. S., Goyal, S., & Chauhan, P. S. (2016). Application of Taguchi Method for Optimization of Process Parameters for Minimum Surface Roughness in Turning of 45C8. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, 3(1), 61–68.
- Galaxy Machinery. (2017). Midas 6. Galaxy Machinery PVT. Ltd. <http://www.galaxymachinery.com/Midas6.html>
- Hutahaean, H. A. (2005). Metode Taguchi-Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya.
- Jenarathanan, M. P., & Jeyapaul, R. (2013). Optimisation of Machining Parameters on Milling of GFRP Composites by Desirability Function Analysis Using Taguchi Method. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(4), 23–36. <https://doi.org/10.4314/ijest.v5i4.3>
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Education.
- Kaswadi, A., Lubis, G. S., & Martowibowo, S. . (2015). Optimalisasi Parameter Proses Cetak Injeksi Plastik dengan Metode Simulasi untuk Menurunkan Cacat Defleksi. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV), MAN-01*.
- Lan, T. S., Chuang, K. C., & Chen, Y. M. (2018). Optimization of Machining Parameters using Fuzzy Taguchi Method for Reducing Tool Wear. *Applied Sciences*, 8(7), 1011. <https://doi.org/10.3390/app8071011>
- Manivel, D., & Gandhinathan, R. (2016). Optimization of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning of Austempered Ductile Iron (grade 3) Using Taguchi Method. *Measurement*, 93, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.055>
- Martowibowo, S. Y., & Wahyudi, A. (2012). Taguchi Method Implementation in Taper Motion Wire EDM Process Optimization. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 93(4), 357–364. <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0043-z>
- Patel, N. S., Parihar, P. L., & Makwana, J. S. (2021). Parametric Optimization to Improve the Machining Process by Using Taguchi Method: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 47(11), 2709–2714. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.005>
- Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Ribeiro, J. E., César, M. B., & Lopes, H. (2017). Optimization of Machining Parameters to Improve the Surface Quality. *Procedia Structural Integrity*, 5(5), 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.182>
- Rochim, T. (2007). *Klasifikasi, Proses, Gaya, dan Daya Permesinan*. Penerbit ITB.
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method* (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers.
- Singh, K., & Sultan, I. (2019). Parameters Optimization for Sustainable Machining by Using Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, 18(7), 4217–4226. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.380>
- Soejanto, I. (2009). *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Graha Ilmu.
- Somani, N., Tyagi, Y. K., & Kumar, P. (2021). Effect of Process Parameters on Machining of D2 Steel Using Taguchi Method. *Recent Trends in Industrial and Production Engineering*, 67–78. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3135-1_8
- Sulaiman, S., Sh Alajmi, M., Wan Isahak, W. N., Yusuf, M., & Sayuti, M. (2022). Dry Milling Machining: Optimization of Cutting Parameters Affecting Surface Roughness of Aluminum 6061 Using the Taguchi Method. *International Journal of Technology (IJTech)*, 13(1), 58–68.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering-Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Thirumalai, R., Senthilkumar, J. S., Selvarani, P., & Ramesh, S. (2013). Machining Characteristics of Inconel 718 Under Several Cutting Conditions Based on Taguchi Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(9), 1889–1897. <https://doi.org/10.1177/0954406212466193>

Analisis Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang dengan Berbagai Metode

Xbal Meiprastyo¹, Ronni IS Rono Hadinagoro¹, Prima Sukma Yuana¹, dan Ragil Rajvikhal¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

xbal.meiprastyo@lecture.unjani.ac.id, ronohadinagoro@gmail.com,

prima.sukma@lecture.unjani.ac.id, ragilrajvikhal99@gmail.com

Abstrak

Jembatan adalah prasarana utama yang menghubungkan dua bagian yang terputus akibat suatu rintangan yang tidak dapat dibangun jalur secara konvensional. Untuk memperlancar dan memudahkan transportasi darat dibutuhkan jembatan guna menghubungkan wilayah satu ke wilayah berikutnya. Fondasi menjadi salah satu bagian konstruksi bangunan gedung yang bertugas menempatkan bangunan dan memindahkan beban terdistribusi dari bangunan atas ke lapisan tanah bawah yang cukup kuat untuk menopangnya tanpa menimbulkan penurunan diferensial pada sistem struktur. Pada lokasi proyek ini dipilih jenis jembatan gantung dengan menggunakan fondasi tiang pancang Strauss. Tujuan dari pekerjaan ini adalah menganalisis daya dukung dan penurunan fondasi berdasarkan data standar uji penetrasi (SPT), uji laboratorium dan sondir/*Cone Penetration Test* (CPT). Pada penelitian ini kedalaman dan diameter yang digunakan sama yang membedakan hanya pada penggunaan metode nya. Berdasarkan hasil analisis didapat nilai daya dukung tanah menggunakan data N-SPT sebesar 2021,72 kN sedangkan nilai daya dukung izin menggunakan data Laboratorium dan Sondir masing-masing didapat nilai sebesar 1108,98 kN dan 804,71 kN.

Kata kunci: Jembatan, Fondasi, Daya Dukung.

Abstract

A bridge is the main infrastructure that connects two parts that are cut off due to an obstacle that cannot be built conventionally. To expedite and facilitate land transportation, bridges are needed to connect one region to the next. The foundation is one part of building construction which functions to place the building and transmit the load distributed from the upper structure to the foundation soil which is strong enough to support it without differential settlement occurring in the structural system. At this project location, a type of suspension bridge was chosen using a Strauss pile foundation. The aim of this research is to analyze the bearing capacity and settlement of foundations based on Standard Penetration Test (SPT) data, laboratory tests and sondir/*Cone Penetration Test* (CPT). In this study, the depth and diameter used are the same, the only difference is the method used. Based on the analysis results, the bearing capacity value using N-SPT data was 2021.72 kN, while the permit carrying capacity value using Laboratory and Sondir data was 1108.98 kN and 804.71 kN respectively.

Keywords: Bridge, Foundation, Bearing Capacity

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan infrastruktur utama yang menghubungkan dua bagian yang dipisahkan oleh rintangan yang tidak dapat dibangun dengan metode tradisional (Suhendra dkk., 2019). Di Indonesia mempunyai perbandingan kontur yang relatif jauh yang disebabkan terdapatnya lereng ataupun perbukitan pula banyaknya sungai. Maka dari itu untuk memperlancar dan memudahkan transportasi darat dibutuhkan jembatan guna menghubungkan wilayah satu ke wilayah berikutnya. Tujuan utama dari sebuah jembatan adalah untuk menghubungkan dua area yang berbeda. Jembatan tersebut kemudian dapat membawa kemajuan yang berbeda bagi kedua wilayah tersebut dalam bidang transportasi, ekonomi, budaya, dan bidang lainnya (PUPR, 2019).

Aksesibilitas penduduk desa di Indonesia terhadap kegiatan sehari-hari begitu terbatas, terutama di wilayah yang dipisahkan oleh lereng terjal, sungai, hingga perbukitan. Hal tersebut memberi batasan akses masyarakat terhadap informasi, pendidikan, pemasaran pertanian hingga akses terhadap produk/jasa yang diinginkan. Dalam situasi seperti ini, daerah di Indonesia memerlukan jembatan penghubung. Satu diantaranya di Desa Mekar Tanjung, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat.

Di wilayah ini ada sebagian titik aliran sungai yang menimbulkan terganggunya akses darat maupun jalur penghubung, sehingga pemerintah membangun jembatan guna menanggulangi permasalahan tersebut. Agar warga dapat beraktivitas dengan mudah serta nyaman.

Info Makalah:

Dikirim : 11-22-23;

Revisi 1 : 02-13-24;

Revisi 2 : 03-04-24;

Diterima : 03-18-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

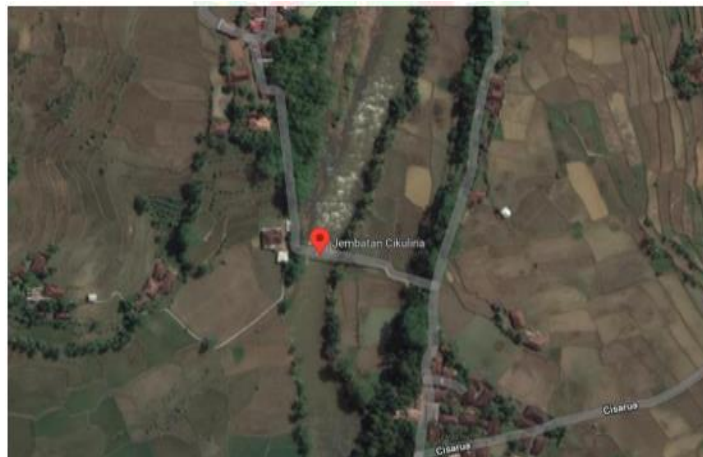
e-mail : xbal.meiprastyo@lecture.unjani.ac.id

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai daya dukung fondasi berdasarkan hasil perhitungan menggunakan data yang ada. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data N-SPT, Sondir dan Laboratorium.

Lokasi penelitian di Desa mekar tanjung, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. Agar sampai di lokasi bisa memakai transportasi roda 4. Berikut peta lokasi daerah penyelidikan tanah yang dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi Penelitian.



Gambar 2. Detail Lokasi Penelitian.

2. Metode

2.1. Jembatan dan Jenis Fondasi Jembatan

Jembatan gantung adalah infrastruktur yang banyak dibangun karena dapat mendukung kegiatan harian dan perekonomian warga. Semua gaya dan beban lalu lintas yang bekerja di jembatan disalurkan melalui sepasang kabel baja yang menopang dua pasang kolom menara serta dua pasang balok jangkar. Fondasi yang direkomendasikan pada pembangunan jembatan gantung dapat menggunakan fondasi tiang bor, fondasi sumuran dan tiang pancang (Setiyarto, 2017).

2.2. Kriteria Pembebanan

Dalam penentuan lokasi jembatan bersumber Pedoman Perencanaan dan Penyelenggaraan Jembatan Gantung (Kementerian Pekerjaan Umum, 2021), perlu melakukan pertimbangan lokasi jembatan sesuai aspek teknis dan ekonomi. Selain itu, juga harus mempertimbangkan ketinggian tempat dimana jembatan hendak dibangun. Tahapan seleksi juga mempertimbangkan pemasangan jembatan dan jalan akses secara keseluruhan. Aspek-aspek yang perlu dipertimbangkan yaitu.

- a. Rentang sesingkat mungkin dari jembatan.
- b. Jembatan penyeberangan harus ditempatkan di bagian sungai yang lurus atau pada aliran air daerah aliran sungai yang terjadi erosi.
- c. Pilih tempat dengan keadaan baik guna menopang jembatan.

Beban di jembatan sudah diatur dalam SNI 1725 tahun 2016. Pada aturan ini, beban-beban yang ada di jembatan meliputi: (SNI 1725, 2016)

- a. Beban Mati Sendiri
- b. Beban Mati Tambahan
- c. Beban Lajur
- d. Beban Angin
- e. Beban Pejalan Kaki
- f. Beban Gempa

2.3. Kriteria Daya Dukung

Selanjutnya menghitung daya dukung fondasi dengan uji N-SPT, uji Laboratorium, uji Sondir.

a. Daya Dukung Fondasi Uji N-SPT

Kapasitas dukung tiang dihitung berdasarkan hasil tinjauan melalui penyelidikan tanah (*soil investigation*) salah satunya dengan menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) sebelum pelaksanaan pekerjaan. Uji SPT dijalankan dengan cara mendorong tabung belah secara vertikal dan membenturkannya ke dalam tanah pada kedalaman 300 mm. Guna menembus tingkat kedalaman tersebut, dibagi menjadi tiga tahap yang tingginya 150 mm. Tahap pertama dicatat menjadi support, sementara tahap kedua dan ketiga dijumlahkan sehingga diperoleh skor resistansi N-stroke atau SPT (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Selanjutnya, nilai SPT dipakai untuk menghitung analisis daya dukung fondasi dalam. Tujuan dari pengujian SPT yaitu untuk mendapatkan nilai N yang diterjemahkan berdasarkan nilai kerapatan relatif pada lapisan tanah yang dilakukan pengujian dan memperoleh deskripsi mengenai lapisan tanah yang didasarkan pengamatan visual (Sari dkk., 2021).

b. Daya Dukung Fondasi Uji Laboratorium

Selain survei tanah lapangan, harus dijalankan survei laboratorium tanah guna menjalankan perhitungan daya dukung tanah, mencakup pengujian mekanis dan fisik tanah (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Tujuan uji fisik ialah guna memahami sifat fisik tanah, dan pengujian mekanis guna mendapatkan skor kohesi tanah dan sudut gesek (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Uji fisik tanah meliputi: uji kandungan air, uji berat jenis dan uji berat jenis (γ). Guna perhitungan daya dukung tiang bor berdasar laboratorium data bisa dijalankan melalui metode *US Army Corps*. Daya dukung tanah maksimum suatu fondasi menggunakan persamaan (6). Daya Dukung Fondasi Uji Sondir. Tahanan ujung ultimit tiang (Q_b) diterangkan oleh persamaan 1.

$$Q_b = A_b \times q_c \quad (1)$$

Meyerhof juga merekomendasikan untuk memakai rumus di atas, dimana nilai q_c ialah rata-rata tahanan ujung konus (8d di atas alas tiang hingga 4d di bawah alas tiang). Satuan tahanan gesek antara permukaan lantai dan tanah juga dapat diperoleh secara eksperimental dari skor tahanan ujung kerucut oleh (Cristady Hardiyatmo, 2017), diantaranya:

Bagi fondasi kayu dan beton dalam tanah pasir

$$f_s = q_c / 200 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

Bagi fondasi baja profil H dalam tanah pasir

$$f_s = q_c / 400 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

Dimana f_s ialah tahanan gesek ultimit permukaan tiang per satuan luas dan q_c ialah tahanan statik rata-rata ujung kerucut (kg/cm²) sepanjang fondasi. Tahanan gesek permukaan tiang diterangkan pada persamaan 4

$$Q_s = A_s \times f_s \quad (4)$$

Sehingga kapasitas ultimit (Q_u), dilakukan perhitungan Dimana f_s adalah tahanan gesek ultimit dinding tiang per satuan luas dan q_c adalah tahanan statik rata-rata ujung kerucut (kg/cm²) sepanjang fondasi. Tahanan gesek dinding tiang dinyatakan dengan persamaan 5.

$$Q_u = A_b q_c + A_s f_s \quad (5)$$

Berdasarkan Meyerhoff (1956), besarnya daya dukung fondasi dari skor N hasil uji SPT dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus berikut.

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (6)$$

$$Q_b = 40 \times N_b \times A_b \quad (7)$$

$$Q_s = n \times \left(\frac{N}{\gamma} \right) \times A_s \quad (8)$$

Dengan ketentuan,

$n = 0,2$ untuk koefisien perlawanan gesek tiang pada tanah lempung kepasiran

$n = 0,5$ untuk koefisien perlawanan gesek tiang pada tanah kelanauan

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \quad (9)$$

Dalam riset Meyerhoff (1976) memberikan rumus berikut guna menghitung tahanan ujung tiang.

$$Q_b = A_b \times (38 \underline{N}) \times \left(\frac{L_b}{d}\right) \leq 380 \underline{N} \times A_s \quad (10)$$

c. Kapasitas Tiang Dalam Tanah Kohesif

Menurut metode Bagemann tahanan kerucut statis (q_c) dihubungkan dengan kohesi tak terdrainase (*undrained cohesion*), seperti yang ditunjukkan pada persamaan 11.

$$q_c = c_u \cdot N_c \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (11)$$

2.4. Kriteria Penurunan (*Settlement*)

Ketika suatu lapisan tanah dibebani, tanah tersebut mengalami tekanan atau penurunan permukaan tanah. Pada tanah berbutir halus yang jenuh air, berpotensi mengalami penurunan konsolidasi. Penurunan ini memerlukan waktu yang lama (Immanuel & Makarim, 2019). Sejumlah penyebab terjadinya amblesan lantaran beban-beban yang bekerja pada permukaan tanah diantaranya:

- Keruntuhan geser atau keruntuhan lantaran melebihi daya dukung tanah,
- Kerusakan atau deformasi berat yang dialami fondasi,
- Deformasi geser tanah penyangga,
- Penurunan tanah lantaran perubahan rongga.

Penurunan konsolidasi yakni tahapan pengecilan pori-pori atau volume tanah yang jenuh dan permeabilitasnya rendah lantaran adanya pembebanan, yang mana proses ini terpengaruh oleh drainase air pori dan kecepatan dari dalam tanah dan pori-pori tersebut (Puspita & Capri, 2017). Indeks Kompresi (C_c) ialah skor indikator tanah C_c yang diperoleh melalui grafik e -log P hasil uji konsolidasi laboratorium dan dipakai guna memperkirakan taraf penurunan permukaan tanah dibawah fondasi yang dialami pada tanah bersangkutan. Beberapa persamaan empiris yang telah ada berkat karya para penulis terdahulu bisa dicermati dalam rumus berikut:

$$S = \frac{D}{100} + \frac{Q \cdot L}{A_p \cdot E_p} \quad (12)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Pembebanan

Gabungan beban dihitung sesuai standar SNI 1725: 2016 untuk beban jembatan dengan skor faktor pembatas akhir yang dipakai guna berat sendiri (MS) senilai 1,3 dan berat beban tambahan (MA) senilai 2,0. Nilai yang dipakai ialah nilai maksimum dari kondisi batas kombinasi beban yang tersedia. Rekapitulasi kombinasi pembebanan yang terjadi pada jembatan dapat dilihat pada SNI 1725:2016.

a. Berat sendiri (MS)

Beban struktur yang digunakan berdasarkan analisis sebesar 405,154 kN

b. Beban mati tambahan (MA)

Beban mati tambahan yang akan bekerja pada struktur atas antara lain sebagai berikut :

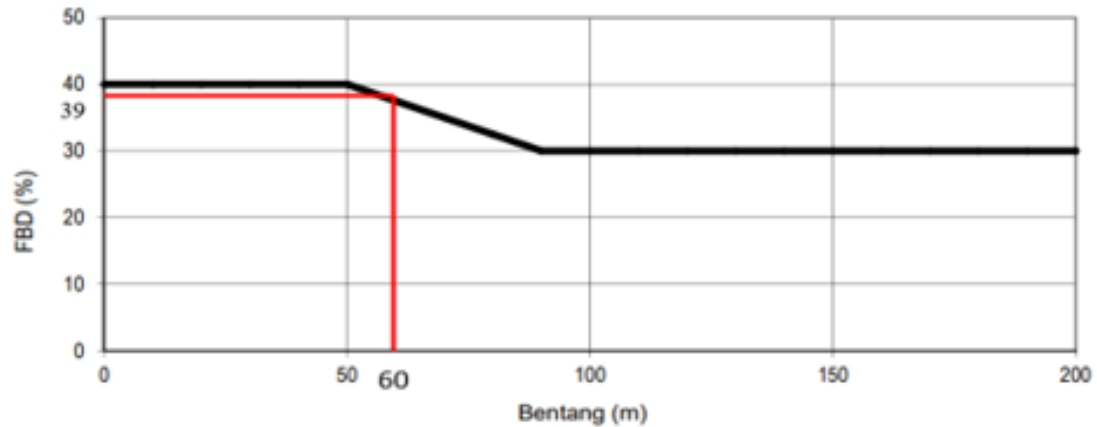
- *Railing* (2 Baris, dia 3")

Massa <i>railing</i>	= 0,25 kN/m
Jumlah	= 2 buah
$Q_{railing}$	= 0,25 kN/m \times 2
	= 0,5 kN/m
- Pipa

Massa pipa	= 0,15 kN/m
Q_{pipa}	= 0,15 kN/m
- Berat Sendiri Pelat = 0,2 m \times 1 m \times 2400 kg/m³
= 480 kg/m
- Berat Air Hujan = 0,05 m \times 1 m \times 980 kg/m³
= 49 kg/m

c. Beban lajur “D” (TD)

Untuk mendapatkan nilai q harus terlebih dahulu mengetahui nilai faktor beban dinamis yang direncanakan sesuai SNI 1725 – 2016 dengan cara memplot panjang jembatan yang terdapat pada Gambar 7. Faktor Beban Dinamis untuk Beban T.



Gambar 7. Faktor Beban Dinamis untuk Beban T.

Berdasarkan grafik didapatkan untuk nilai FBD bentang jembatan 60 m yaitu 39%. Maka dengan menggunakan Persamaan 1 beban lajur yang didapat:

$$q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) kpa$$

$$= 6,75 \text{ kPa}$$

Beban Terbagi Rata = 6,75 kPa

$$\begin{aligned} \text{Beban Garis Terpusat} &= 49 \times (1 + \text{FBD}) \\ &= 49 \times (1 + 0,39) \\ &= 49 \times 1,39 \\ &= 68,11 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

d. Beban pejalan kaki (TP)

Seluruh komponen perkerasan dengan lebar lebih dari 600 mm harus dirancang mampu menopang beban pejalan kaki dengan kekuatan 5 kPa dan diharapkan dapat berfungsi bersamaan dengan beban kendaraan pada setiap lajur. Jika trotoar dapat dilalui, maka tidak perlu diasumsikan bahwa beban pejalan kaki (Putra dkk., 2022).

e. Beban gempa (EQ)

Beban gempa yang digunakan pada pemodelan ini digunakan nilai berikut ini:

$$Kh = C \times S = 0,1 \times 3,0 = 0,3$$

$$TEQ = Kh \times I \times WT = 0,3 \times 1,0 \times 1544,5 \text{ kN} = 463,35 \text{ k}$$

f. Beban angin (EW)

Beban akibat angin diperkirakan bekerja pada mobil sebagai tekanan konstan 1,46 N/mm tegak lurus 1,8 m di atas jalan. Pada Tabel 2 ditunjukkan Gaya Angin pada Kendaraan (EW_L) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Gaya Angin pada Kendaraan (EW_L).

No	Panjang	h (m)	q (kN/m)	Ew (kN)	0,5 Ew (kN)
1	60	1,8	1,46	87,6	43,8

Tekanan Angin Vertikal (EWS) diambil nilai $9,6 \times 10^{-4}$ Mpa dikalikan dengan lebar jembatan. Gaya Angin pada Kendaraan (EWS) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Gaya Angin pada Kendaraan (EWS).

No	Panjang	h (m)	q (kN/m)	Ew (kN)	0,5 Ew (kN)
1	60	3	0,96	172,8	86,4

Berdasarkan hasil perhitungan beban di atas, maka rekapitulasi pembebanan yang digunakan untuk pemodelan fondasi ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Rekap Pembebanan.

Beban	Kode	Gaya Vertikal P (kN)	Gaya Horizontal P (kN)
Berat sendiri	MS	405,15	
Beban tambahan	MA	356,4	
Beban Lajur "D"	TD	74,86	
Beban pejalan kaki	TP	5	
Tekanan angin vertikal	Ews	86,4	
Beban angin kendaraan	Ewl	43,8	
Beban gempa	EQ		463,35

3.2 Analisis Penurunan

Berdasarkan beban-beban yang sebelumnya sudah direkap pada Tabel 4 selanjutnya dilakukan perhitungan terkait penurunan fondasi pada struktur jembatan gantung yang direncanakan. Berikut ini ditampilkan perhitungan penurunan pada fondasi. Adapun data analisis perhitungan sebagai berikut.

- Beban yang bekerja : 405,15 kN
- Diameter tiang fondasi (D) : 0,4 m
- Panjang tiang fondasi (L) : 10 m
- Modulus Elastisitas (E_p) : 33.892.181,99 Ton
- Luas penampang tiang (A_p) : 0,126 m²

Analisis perhitungan mengacu persamaan 12, sebagai berikut:

$$S = \frac{0,4}{100} + \frac{405,154 \cdot 10}{0,126 \cdot 33892181,99}$$

$$S = 0,00495 \text{ m} = 4,95 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil analisis penurunan yang dilakukan didapatkan nilai penurunan (S) sebesar 4,95 mm, nilai ini masih memenuhi kriteria izin karena lebih kecil dari Penurunan izin $< 15 \text{ cm} + b/600$ (b dalam satuan cm) (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

3.3 Hasil Analisis Perhitungan Daya Dukung

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, nilai daya dukung yang berbeda tergantung parameter input yang digunakan. Hasil analisis daya dukung izin fondasi (Tabel 4 sampai Tabel 6).

Tabel 4. Rekapitulasi Perhitungan Menggunakan Data N-SPT.

Data	Qb (kN)	Qs (kN)	Wp	Qu (kN)	Qa (kN)
N-SPT	7539,82	753,98	30,16	8274,48	2021,72

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Menggunakan Data Laboratorium.

Data	Qb (kN)	Qs (kN)	Wp	Qu (kN)	Qa (kN)
Laboratorium	1655,29	2277,71	30,16	3913,68	1108,98

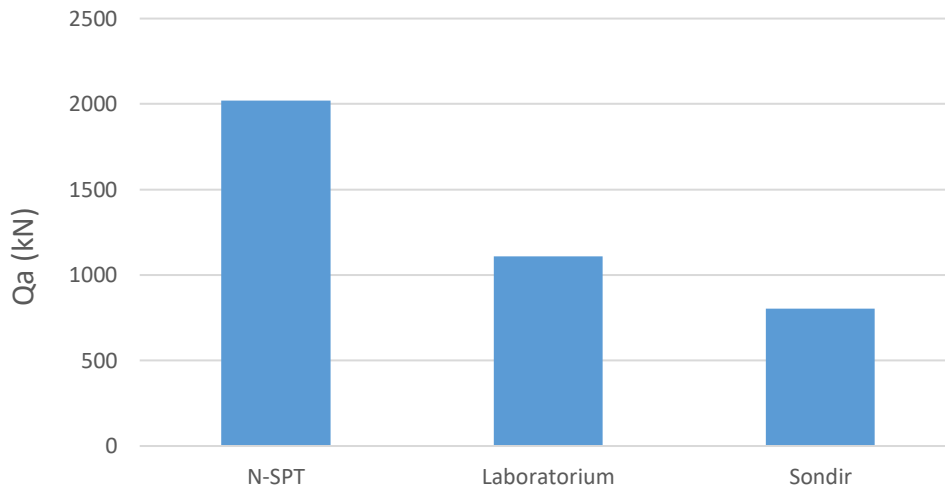
Tabel 6. Rekapitulasi Perhitungan Menggunakan Data Sondir.

Data	Qb (kN)	Qs (kN)	Wp	Qu (kN)	Qa (kN)
Sondir	282,600	1413,00	30,16	284,01	804,71

3.4 Pembahasan

Dari hasil analisis sebelumnya, didapat nilai daya dukung yang bervariasi dari setiap data yang digunakan, metode pengambilan sampel dan formula yang berbeda menjadi beberapa faktor penyebabnya. Berdasarkan data N-SPT nilai daya dukung izin yang diperoleh sebesar 2021,72 kN sedangkan nilai daya dukung izin menggunakan data

Laboratorium dan Sondir masing-masing didapatkan nilai sebesar 1108,98 kN dan 804,71 kN. Perbedaan nilai daya dukung izin tersebut ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Hasil Daya Dukung Izin Tiang.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan. Beban vertikal yang diteruskan ke fondasi (berdasarkan hasil analisis struktur atas) sebesar 405,154 kN. Daya dukung izin tiang dengan menggunakan data N-SPT, data laboratorium, data sondir masing-masing diperoleh nilai sebesar 2021,72 kN, 1108,98 kN dan 804,71 kN. Deviasi atau perbedaan nilai daya dukung izin fondasi pada setiap analisis dikarenakan perbedaan parameter input, penurunan yang terjadi pada fondasi yang diakibatkan beban struktur atas masih masuk kriteria izin dengan nilai sebesar 4,95 mm (dari Penurunan izin $< 15 \text{ cm} + b/600$).

Ucapan Terima Kasih

Kami sampaikan ucapan terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah memberikan bantuan melalui hibah penelitian internal 2023.

Daftar Notasi

Qult	= Daya Dukung Ultimate
Qb	= Tahanan Ujung
Qs	= Tahanan Gesek
Ab	= Luas Dasar Tiang/Luas Penampang Tiang Fondasi
fb	= Tahanan Ujung Neto Per Satuan Luas
N60	= Rata-rata N-SPT Antara Ujung Tiang Fondasi
db	= Diameter Ujung Bawah Tiang Fondasi
dr	= Lebar Referensi, 300 mm
σ	= Tegangan Referensi, 100 kPa
D	= Diameter
L	= Panjang Tiang
σ'	= Tegangan Efektif
Nq	= Faktor Kuat Dukung Ujung
δ	= Sudut Geser Antara Tiang Dengan Tanah
K	= Koefisien Tekanan Tanah Lateral Pada Sisi Tiang Fondasi
Cu	= Kohesi <i>Undrained</i>
Φ	= Sudut Geser Tanah
E	= Modulus Elastisitas Tiang
η_h	= Koefisien Reaksi Subgrade
Hu	= Beban Lateral/Daya Dukung Lateral Ultimate
f	= Jarak Momen Maksimum Dari Permukaan Tanah (M)
g	= Jarak Momen Maksimum Sampai Dasar Tiang (M)
Qb	= Tahanan Ujung
Qs	= Tahanan Gesek

Ab	= Luas Dasar Tiang/Luas Penampang Tiang Fondasi
fb	= Tahanan Ujung Neto Per Satuan Luas
N60	= Rata-rata N-SPT Antara Ujung Tiang Fondasi

Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. *Standar Nasional Indonesia*, 8460, 1–323.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 4153:2019 Metode Uji Penetrasi Standar (SPT) dan Pengambilan Contoh Tanah Dengan Tabung Belah*. 26.
- Cristady Hardiyatmo, H. (2017). *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. 3.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan. *Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018, Revisi 2*, 1–1036.
- Immanuel, J., & Makarim, C. A. (2019). Analisis Service Life Terhadap Berbagai Jenis Material Reklamasi Diatas Tanah Lunak. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(1), 95. <https://doi.org/10.24912/jmts.v2i1.3039>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2021). Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 02 / SE / M / 2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki. *Kementerian Pekerjaan Umum*, 02, 1–63.
- PUPR, K. (2019). Kementerian pekerjaan umum dan perumahan rakyat direktorat jenderal cipta karya 2019. *Buku Saku Petunjuk Konstruksi Jembatan*, 1–34.
- Puspita, N., & Capri, A. (2017). Analisa Penurunan Tanah Lunak Dengan Beberapa Metode Konsolidasi Pada Proyek Jalan Tol Palindra. *Cantilever*, 6(1). <https://doi.org/10.35139/cantilever.v6i1.49>
- Putra, R. A., Tanjung, D., & Simbolon, R. (2022). Evaluasi Perencanaan Struktur Atas Jembatan Beton Bertulang Bentang 10 Meter Kelas Ii Dengan Menggunakan Beban Gempa Sni 1726-2019. *Semnastek-Uisu*, 63–71.
- Sari, U. C., Sholeh, Moh. N., Pratama, M. M. A., Aritonang, I. J., & Prasetya, F. D. (2021). Analisis Kapasitas Daya Dukung Pada Ragam Pondasi Beton Bulat Menggunakan Standard Penetration Test (Spt). *Pondasi*, 26(1), 38. <https://doi.org/10.30659/pondasi.v26i1.17461>
- Setiyarto, Y. D. (2017). Standar Pembebanan Pada Jembatan Menurut SNI 1725 2016. *The Loading Standards on Bridges According to SNI 1725 2016*, 9, 8.
- SNI 1725. (2016). Pembebanan untuk jembatan. *Bsn*, 1–63.
- Suhendra, S., Nuklirullah, M., & Muhammad, I. F. (2019). Analisis Struktur Jembatan Sungai Kampung Tengah Kecamatan Pelayangan Kota Jambi. *Jurnal Talenta Sipil*, 2(2), 50. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v2i2.18>