

p-ISSN 2655-9145
e-ISSN 2684-8201



JAMETECH

**Journal of
APPLIED MECHANICAL ENGINEERING
AND GREEN TECHNOLOGY**



Volume 4 | Number 1 | Pages 1-45 | April 2026

JAMETECH

Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Gedung P3M, It.1 Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran
PO BOX 1064 Kuta Selatan, Badung, Bali -Indonesia
Telp. (+62)361 701981 Fax. (+62)361 701128
Email: jametech@pnb.ac.id

JAMETECH JOURNAL TEAM

Advisors

I Nyoman Abdi (Director of Politeknik Negeri Bali)
A. A. Ngurah Bagus Mulawarman (First Vice Director of Politeknik Negeri Bali)
Putu Adi Suprpto (Head of Research Centre and Community Services of Politeknik Negeri Bali)
Komang Widhi Widantha (Head of Scientific Publication Unit of Politeknik Negeri Bali)
I Nyoman Kusuma Wardana (Person in Charge of the Journal Management Team)

Editor-in-Chief

I Gede Artha Negara

Associate Editor

I Made Rasta

Editorial Boards

I Wayan Sutina (Politeknik Negeri Bali)
I Made Bagus Panji Aditya (Politeknik Negeri Bali)
I Wayan Agus Rantia Dana (Politeknik Negeri Bali)

LANGUAGE EDITORS

Muhammad Nova (Politeknik Negeri Bali)

PEER REVIEWERS

I Dewa Made Cipta Santosa (Politeknik Negeri Bali)
Daud Simon Anakottapary (Politeknik Negeri Bali)
I Nyoman Suamir (Politeknik Negeri Bali)
I Wayan Temaja (Politeknik Negeri Bali)
Haolia Rahman (Politeknik Negeri Jakarta)
I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa (Universitas Udayana)
I Putu Angga Yuda Pratama (Universitas Udayana)
I Wayan Arya Darma (Universitas Udayana)
Edi Karyadi (Politeknik Negeri Pontianak)
Lohdy Diana (Politeknik Elektronika Negeri Surabaya)
Katiko Imamul Muttaqin (Politeknik Negeri Banjarmasin)

ADMINISTRATOR

Cokorda Gde Candra Hadiputra

PREFACE

JAMETECH: Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology promotes and enhances research developments and the publication of original research papers, review articles, short reports, and experimental details. The research article submitted to this journal will be peer-review double-blinded at least 2 (two) or more expert reviewers. The reviewers give scientific valuable comments improving the contents of the manuscript. The journal also provides platforms for debate and the dissemination of research findings while facilitating discussions on new research areas and techniques.

The scope of the journal encompasses research into broad aspects of Mechanical Engineering, Green Technology, and associated fields, including Mechanics, Materials, Manufacturing and Production, Design and Construction, Automotive, Refrigeration, Heating, Ventilating, and Air Conditioning (RHVAC), Mechanical, Electrical, and Plumbing for Buildings, Sustainable Energy Management and Technology, and New and Renewable Energy Technologies.

JAMETECH. p-ISSN 2655-9145

JAMETECH. e-ISSN 2684-8201

Indexing: GOOGLE SCHOLAR, DOAJ, CROSSREF, GARUDA

Best Regard,

JAMETECH Editorial Team

TABLE OF CONTENTS

Analisis Alat Tanam Padi dengan Sistem Gerak Putaran	1-7
Analisis Pengaruh Aliran Fluida Pendingin dan Waktu Pengelasan Spot Welding Kw14-1031 Terhadap Kekuatan Tarik Pelat Baja ST 40	8-13
Pengaruh Arus Listrik Spot Welding KW14-1031 Terhadap Kekuatan Geser Pada Baja St42	14-19
Studi Eksperimental Perpindahan Panas pada Pengering Sepatu Berbasis Rak Datar	20-25
Menekan Nilai SAIDI SAIFI pada Penyulang Monkey Forest dengan Pemasangan D-Star (Doble Isolator Tarik) dan Perisai Binatang	26-32
Evaluasi Kinerja dan Efektivitas CVT sebagai Sistem Transmisi pada Kendaraan Buggy 2WD	33-39
Comparative Study of Chemically Treated Agel Fiber-Reinforced Composites under Flexural Loading	40-45



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Analisis Alat Tanam Padi dengan Sistem Gerak Putaran

Made Ardikosa Satrya Wibawa^{1*}, Anak Agung Gede Pradnyana Diputra¹, I Wayan Suma Wibawa¹, I Wayan Marlon Managi¹, I Nyoman Suparta¹ dan I Ketut Suherman¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80364, Indonesia

*Email: ardikosa_satrya@pnb.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan alat tanam padi dengan sistem gerak berputar (*circular motion*) yang memiliki tingkat efisiensi dan efektivitas tinggi, khususnya diaplikasikan pada lahan sawah berukuran sempit seperti yang banyak ditemukan di wilayah Bali. Alat tanam padi yang dikembangkan memiliki spesifikasi teknis utama berupa rangka berbahan besi tahan karat, sistem penggerak manual menggunakan spindle putar, sistem transmisi menggunakan rantai dan sprocket, serta mekanisme penanam menggunakan poros utama dengan sistem penjepit bibit mekanis. Sistem pengoperasian dirancang ergonomis untuk mengurangi beban kerja petani serta memudahkan proses perawatan karena tidak memerlukan sumber energi tambahan seperti bahan bakar maupun listrik. Pengujian kinerja alat dilakukan secara langsung di area persawahan Subak Ulun Suwi, Kabupaten Gianyar. Metode pengujian dilakukan dengan membandingkan waktu proses tanam padi menggunakan metode tradisional (*manual*) dengan penggunaan alat yang dikembangkan. Parameter pengamatan meliputi waktu kerja, kemudahan operasional, kebutuhan tenaga kerja, serta konsistensi hasil penanaman bibit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat tanam padi dengan sistem gerak *circular motion* meningkatkan efisiensi waktu kerja secara signifikan. Waktu tanam rata-rata menurun dari sekitar 24 menit per 100 m² pada metode manual menjadi sekitar 13 menit per 100 m² menggunakan alat, atau terjadi peningkatan efisiensi waktu mendekati 50%. Selain itu, penggunaan alat mampu mengurangi beban kerja fisik petani karena proses penanaman tidak lagi memerlukan posisi membungkuk dalam waktu lama. Beberapa kendala teknis masih ditemukan, terutama terkait ketidakkonsistenan jumlah bibit yang tertanam pada beberapa titik lahan. Faktor yang mempengaruhi antara lain kondisi lumpur sawah, variasi ukuran bibit, serta kestabilan mekanisme penjepit selama proses penanaman berlangsung. Secara keseluruhan, alat tanam padi dengan mekanisme gerak *circular motion* memiliki potensi besar dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi proses tanam padi, khususnya pada lahan sawah sempit dan berterasering. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan stabilitas mekanisme penanaman dan konsistensi jumlah bibit yang ditanam sehingga alat dapat menjadi solusi mekanisasi pertanian yang terjangkau dan sesuai dengan kondisi pertanian di Bali.

Kata kunci: alat tanam padi, gerak melingkar, efisiensi, lahan sempit, Bali

Abstract: This study aims to design and develop a circular motion rice planting tool with high efficiency and effectiveness, particularly for narrow rice fields commonly found in Bali. The developed tool features a stainless steel frame, a manual drive system using a rotating spindle, a chain and sprocket transmission system, and a planting mechanism consisting of a main shaft equipped with a mechanical seedling clamp. The tool is ergonomically designed to reduce farmers' physical workload and simplify maintenance, as it does not require additional energy sources such as fuel or electricity. Performance testing was conducted directly in rice fields located in Subak Ulun Suwi, Gianyar Regency. The testing method compared the time required for rice planting using traditional manual methods and the developed tool. Observation parameters included working time, ease of operation, labor requirements, and consistency of seedling planting results. The results showed that the circular motion rice planting tool significantly improved time efficiency. The average planting time decreased from about 24 minutes per 100 m² using manual methods to approximately 13 minutes per 100 m² using the tool, indicating a time efficiency improvement of nearly 50%. Additionally, the tool reduced farmers' physical strain because the planting process no longer required prolonged bending. However, some technical challenges were still identified, particularly related to inconsistent numbers of seedlings planted at certain field points. These issues were influenced by variations in mud field conditions, differences in seedling size, and the stability of the clamping mechanism during operation. Overall, the circular motion rice planting tool shows strong potential to improve productivity and planting efficiency, especially in narrow and terraced rice fields. Further development is needed to enhance planting mechanism stability and ensure consistent seedling placement, enabling the tool to become an affordable and practical agricultural mechanization solution suitable for Bali.

Keywords: rice transplanter, circular motion, efficiency, narrow fields, Bali

1. Pendahuluan

Sumber daya manusia pertanian memiliki peran strategis dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan. Rencana Strategis Kementerian Pertanian menekankan pembangunan pertanian berkelanjutan melalui pengelolaan optimal sumber daya alam, manusia, kelembagaan, dan teknologi untuk menjaga kesinambungan produksi serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Oleh karena itu, kualitas dan komitmen sumber daya manusia menjadi faktor kunci keberhasilan pembangunan pertanian berkelanjutan [1].

Di Bali, pertanian tidak hanya berfungsi sebagai sektor ekonomi tetapi juga bagian dari budaya yang mendukung pariwisata melalui nilai religius dan lingkungan yang sejalan dengan filosofi Tri Hita Karana. Namun, pesatnya perkembangan pariwisata memicu alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan non-pertanian seperti perumahan, fasilitas pariwisata, dan infrastruktur kota. Selain itu, minat generasi muda terhadap sektor pertanian menurun, daya dukung lingkungan berkurang, serta teknologi pertanian masih relatif mahal dan kurang sesuai dengan kondisi lahan sawah Bali yang umumnya sempit dan berkontur [2].

Proses penanaman padi masih banyak dilakukan secara manual melalui sistem tander, yang membutuhkan waktu lama, tenaga kerja banyak, serta menimbulkan kelelahan bagi petani. Berdasarkan observasi di Subak Ulun Suwi, penanaman padi seluas 1 are membutuhkan waktu 1–1,5 jam oleh dua orang pekerja. Kondisi ini juga meningkatkan biaya produksi, terutama untuk upah tenaga kerja.

Meskipun alat tanam padi sudah tersedia di pasaran, harganya relatif mahal dan penggunaannya cukup kompleks karena memerlukan sistem penggerak tambahan serta media tanam khusus. Oleh karena itu, diperlukan inovasi alat tanam yang lebih sederhana, ringan, dan ekonomis. Penelitian ini bermaksud membuat alat tanam yang digerakkan secara manual melalui putaran *spindle* yang ditransmisikan dengan rantai untuk menghasilkan gerakan melingkar pada mekanisme penanaman. Alat ini dirancang agar mudah dioperasikan, ringan, dan cukup dijalankan oleh satu orang petani sehingga dapat meningkatkan efisiensi waktu dan menekan biaya produksi petani.

Kebaruan produk merupakan aspek penting dalam penelitian untuk menghindari duplikasi sekaligus mengembangkan inovasi baru. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan ketersediaan alat pertanian berteknologi yang sesuai dengan kondisi petani. Salah satu permasalahan yang masih dihadapi adalah keterbatasan alat tanam padi yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia. Berdasarkan hasil observasi di beberapa wilayah Bali, alat tanam padi yang tersedia di pasaran umumnya masih berharga mahal, sebagian merupakan produk impor, serta memiliki dimensi dan bobot yang kurang sesuai dengan kondisi sawah Bali yang berpetak kecil dan memiliki kontur terasering. Selain itu, sebagian alat tanam padi memerlukan media semai khusus yang menambah biaya produksi petani. Secara umum, alat tanam padi yang tersedia masih menggunakan mekanisme poros eksentrik sebagai sistem gerak penanaman [3].

Mekanisasi pertanian menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi tenaga kerja, penggunaan sumber daya, produktivitas, kualitas hasil panen, serta mendukung

keberlanjutan lingkungan dan peningkatan kesejahteraan petani. Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui perancangan alat tanam padi dengan mekanisme gerak *circular* (berputar) yang dilengkapi penjepit bibit pada ujung poros. Mekanisme ini bekerja secara konstan dan bergantian hingga bibit tertanam pada lahan sawah. Alat ini juga dirancang menggunakan bibit hasil persemaian tradisional tanpa memerlukan media tanam khusus [4].

Penggunaan alat tanam padi model *circular* diharapkan mampu menghemat waktu dan biaya pada proses tanam serta meningkatkan efisiensi kerja mulai dari tahap persemaian hingga penanaman. Penelitian ini bertujuan merancang alat tanam padi dengan dimensi dan desain yang sesuai dengan karakteristik lahan sawah di Pulau Bali [5].

1.1. Padi

Tanaman padi merupakan tanaman pangan utama penghasil beras yang menjadi sumber karbohidrat bagi sebagian besar penduduk dunia. Di Indonesia, sekitar 95% masyarakat mengonsumsi beras sebagai makanan pokok, sehingga kebutuhan beras terus meningkat seiring pertumbuhan jumlah penduduk. Data BPS menunjukkan bahwa tingkat konsumsi beras di Indonesia tergolong tinggi, yaitu sekitar 97,4 kg per kapita per tahun [6].

Padi menjadi komoditas pangan strategis karena kandungan nutrisinya cukup lengkap. Beras giling mengandung sekitar 78,9% karbohidrat, 6,8% protein, 0,7% lemak, serta komponen nutrisi lain dalam jumlah kecil. Dengan jumlah penduduk yang besar, Indonesia menghadapi tantangan dalam menjaga ketersediaan pangan terutama beras.

Secara umum, padi merupakan tanaman semusim yang memiliki empat fase pertumbuhan, yaitu vegetatif cepat, vegetatif lambat, reproduktif, dan pemasakan. Struktur tanaman padi terbagi menjadi bagian vegetatif dan generatif. Bagian vegetatif terdiri dari akar, batang, dan daun, sedangkan bagian generatif terdiri dari malai yang berisi bulir padi.

Dalam pertumbuhannya, tanaman padi membutuhkan unsur hara, air, dan energi matahari. Unsur hara berfungsi dalam pembentukan senyawa penting seperti hormon, enzim, dan asam nukleat. Air diperoleh dari tanah, sedangkan energi diperoleh dari proses fotosintesis. Tanaman padi termasuk kelompok Gramineae yang memiliki batang beruas-ruas dengan bagian dalam berongga. Pada setiap ruas terdapat buku yang menjadi tempat tumbuh daun pelepah. Bagian daun terdiri dari ligula (lidah daun), auricle (telinga daun), dan helaian daun. Warna ligula dan auricle dapat digunakan sebagai identifikasi varietas padi tertentu.

1.1.1. Klasifikasi tanaman padi

Secara sistematis tumbuhan, padi diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Kingdom: *Plantae*
- b. Divisi: *Spermatophyta*
- c. Sub-divisi: *Angiospermae*
- d. Kelas: *Monocotyledoneae*
- e. Ordo: *Glumiflorae*
- f. Famili: *Gramineae*
- g. Subfamili: *Oryzoideae*
- h. Genus: *Oryza*
- i. Spesies: *Oryza sativa* L

1.1.2. Morfologi tanaman padi

Tanaman padi memiliki sistem perakaran serabut. Pada fase perkecambahan muncul akar primer dan akar seminal, yang kemudian digantikan oleh akar adventif yang tumbuh dari buku batang terbawah. Batang padi tersusun atas beberapa ruas, dimana pemanjangan ruas terjadi saat memasuki fase reproduktif.

Daun padi berbentuk lanset dengan tulang daun sejajar dan permukaan ditutupi rambut halus. Pada bagian paling atas terdapat daun bendera yang berperan penting dalam proses pengisian bulir padi. Bunga padi tersusun dalam bentuk malai, dimana setiap unit bunga disebut spikelet. Bunga padi terdiri dari tangkai bunga, bakal buah, lemma, palea, benang sari, dan putik. Setiap spikelet hanya memiliki satu bunga dengan satu organ betina dan enam organ jantan.

Pertumbuhan tanaman padi terdiri dari tiga fase utama yaitu vegetatif, reproduktif, dan pemasakan. Fase vegetatif dimulai sejak awal pertumbuhan hingga pembentukan primordia. Fase reproduktif ditandai dengan pemanjangan batang dan pembentukan bunga. Fase pemasakan dimulai dari pengisian gabah hingga gabah matang. Buah padi terbentuk setelah proses penyerbukan dan pembuahan. Buah ini dilindungi oleh lemma dan palea yang membentuk sekam. Bagian dalam biji terdiri dari endosperm yang kaya pati dan embrio sebagai calon tanaman baru.

1.1.3. Syarat tumbuh tanaman padi

Tanaman padi dapat tumbuh optimal di daerah tropis dan subtropis pada lintang 45° LU hingga 45° LS. Tanaman ini membutuhkan suhu hangat, kelembaban tinggi, serta musim hujan sekitar empat bulan. Curah hujan ideal berkisar 1500–2000 mm per tahun atau sekitar 200 mm per bulan.

Di dataran rendah, padi tumbuh baik pada ketinggian 0–650 mdpl dengan suhu 22–27°C. Sedangkan di dataran tinggi (650–1500 mdpl), suhu optimal berkisar 19–23°C. Tanaman padi memerlukan sinar matahari penuh tanpa naungan. Padi sawah umumnya ditanam pada tanah lempung berat atau tanah dengan lapisan kedap air sekitar 30 cm di bawah permukaan tanah. Tanah lumpur subur dengan ketebalan 18–22 cm sangat ideal untuk pertumbuhan padi. Tingkat keasaman tanah yang sesuai berkisar pH 4–7, dan pada kondisi tergenang biasanya pH tanah mendekati netral.

Ketersediaan air sangat menentukan keberhasilan pertumbuhan padi. Kekurangan atau kelebihan air dapat mempengaruhi penyerapan unsur hara, pertumbuhan tanaman, serta meningkatkan risiko serangan hama dan penyakit. Kebutuhan air dipengaruhi oleh varietas padi, fase pertumbuhan, kondisi cuaca, serta jenis tanah. Air sawah umumnya berasal dari curah hujan dan sistem irigasi. Sebagian besar budidaya padi dunia masih mengandalkan air hujan.

1.1.4. Metode tanam SRI (System of Rice Intensification)

Metode SRI merupakan teknik budidaya padi yang menekankan efisiensi air, peningkatan kesehatan tanah, dan peningkatan produktivitas tanaman. Pada metode ini, benih ditanam dengan jarak tanam lebar, umumnya 27×27 cm hingga 35×35 cm. Kedalaman lapisan olah

tanah dijaga sekitar 25–30 cm untuk mendukung perkembangan akar.

Penanaman menggunakan satu bibit per lubang tanam bertujuan untuk meningkatkan jumlah anakan dan kekuatan tanaman. Bibit dari persemaian harus segera ditanam, maksimal 15 menit setelah dicabut, untuk menjaga aktivitas fisiologis tanaman. Bibit ditanam dangkal sekitar 0,5–1 cm dengan posisi akar horizontal. Kondisi lahan tidak digenangi air, namun dijaga tetap lembab. Penanaman terlalu dalam atau genangan air berlebihan dapat menyebabkan pembusukan akar dan menurunkan produktivitas tanaman.

1.1.5. Manfaat metode tanam SRI

Penerapan metode SRI memberikan berbagai keuntungan, antara lain [7]:

- Menghemat penggunaan air hingga sekitar 20–30% dibanding metode konvensional.
- Memperbaiki struktur dan kesuburan tanah serta menjaga keseimbangan ekosistem tanah.
- Meningkatkan kemandirian petani karena mengurangi ketergantungan terhadap pupuk dan pestisida kimia.
- Membuka peluang kerja di pedesaan dan meningkatkan pendapatan petani.
- Menghasilkan beras berkualitas tinggi dan lebih sehat karena minim residu bahan kimia.
- Menjaga kualitas tanah untuk keberlanjutan pertanian generasi mendatang.

2. Metode dan Bahan

2.1. Desain

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental melalui perancangan, pembuatan, dan pengujian alat tanam padi berbasis sistem gerak melingkar (*circular motion*). Tahapan penelitian meliputi perancangan teknis, analisis material, perhitungan mekanisme transmisi, fabrikasi prototipe, serta pengujian kinerja alat di lapangan. Pemilihan metode ini didasarkan pada masih dominannya sistem penanaman konvensional yang memiliki keterbatasan efisiensi waktu dan beban kerja petani [8].

Untuk mengatasi keterbatasan sistem manual, dikembangkan alat tanam padi dengan prinsip gerak rotasi kontinu. Sistem mekanisme utama bekerja dengan mengkonversi putaran spindle manual melalui sistem transmisi rantai dan sprocket menjadi gerakan rotari pada poros penanam yang dilengkapi mekanisme penjepit bibit secara periodik. Sistem ini dirancang agar mampu menghasilkan siklus penanaman yang stabil dan berulang selama alat bergerak maju mengikuti lintasan tanam [9].

Hasil yang diperoleh selama pelaksanaan penelitian meliputi proses perancangan dan pembuatan prototipe alat tanam padi model *circular* beserta perlengkapannya. Selain itu, dilakukan tahap pengujian menggunakan alat ukur pada lahan persawahan yang telah dipersiapkan sebagai lokasi uji coba. Adapun tahapan yang dilakukan dalam pembuatan alat penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Observasi lapangan

Tahap awal dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan serta kebutuhan petani dalam proses penanaman padi. Selanjutnya dilakukan pengamatan

secara langsung untuk memperoleh informasi mengenai keunggulan, kelemahan, serta hambatan yang dialami petani saat melakukan penanaman padi secara tradisional (manual).

b. Perancangan desain

Perancangan desain alat tanam padi dilakukan melalui pembuatan sketsa teknik dan pengembangan gambar kerja yang mencakup konfigurasi rangka, sistem transmisi, serta mekanisme penanam bibit. Perancangan disusun berdasarkan hasil observasi lapangan terhadap kondisi sawah sempit dan sistem tanam tradisional sehingga diperoleh desain alat yang sesuai dengan kebutuhan operasional petani di lapangan. Secara teknis, alat tanam padi yang dirancang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Dimensi dan Berat Alat

- Panjang alat: 800 mm
- Lebar alat: 300 mm
- Tinggi alat: 800 mm
- Berat total alat: ± 12 kg

Dimensi ini dirancang agar alat tetap stabil saat dioperasikan pada lahan sawah berlumpur serta mudah dikendalikan oleh satu petani.

2. Material Konstruksi

- Rangka utama: Besi *hollow* 2x2 cm
- Poros utama: Besi Pejal dia 50 mm
- Mekanisme penjepit: *Stainless steel*
- Dudukan komponen: Plat baja 2–3 mm

Pemilihan material mempertimbangkan kekuatan mekanis, ketahanan terhadap korosi air sawah, serta kemudahan proses manufaktur.

3. Sistem Transmisi dan Komponen Putar

- Diameter spindle penggerak: 25 mm
- Diameter sprocket penggerak: 75 mm
- Diameter sprocket yang digerakkan: 180 mm
- Jenis rantai: Rantai rol standar (ANSI chain setara)
- Rasio transmisi: 1 : 2

Sistem transmisi dirancang untuk menghasilkan putaran stabil pada poros penanam dengan beban kerja lumpur sawah.

4. Mekanisme Penjepit Bibit

- Jenis mekanisme: Penjepit mekanis sistem pegas
- Panjang penjepit: 60 mm
- Lebar penjepit: $\pm 20 - 30$ mm
- Sistem kerja: Membuka saat posisi atas, menutup saat posisi tanam akibat gaya pegas

Mekanisme ini dirancang untuk menjaga posisi bibit tetap tegak saat proses penanaman berlangsung.

5. Sistem Wadah Bibit

- Kapasitas wadah bibit : $\pm 2 - 3$ kg bibit padi
- Material wadah: Plat Seng Galvalum
- Sistem suplai bibit: Sistem tekan dengan besi pemberat dan gravitasi menuju mekanisme penjepit

Kapasitas wadah dirancang agar mampu mendukung proses tanam kontinu tanpa sering melakukan pengisian ulang.

6. Sistem Operasi Alat

Alat dioperasikan secara manual dengan sistem dorong sambil memutar spindle. Putaran spindle diteruskan melalui sistem transmisi rantai untuk menggerakkan poros penanam secara rotasi kontinu sehingga menghasilkan siklus penanaman yang stabil.

c. Analisis kekuatan dan pemilihan material

Pemilihan bahan dilakukan dengan mempertimbangkan kekuatan konstruksi alat agar sesuai dengan beban kerja yang akan diterima. Selain itu, pemilihan material dan komponen juga disesuaikan dengan kebutuhan fungsi kerja alat secara keseluruhan [10].

d. Pembuatan gambar teknik (gambar kerja)

Gambar kerja dibuat sebagai acuan utama dalam proses produksi alat. Gambar ini mencakup detail ukuran, dimensi, serta spesifikasi komponen yang akan digunakan pada proses pembuatan.

e. Pengadaan material

Sebelum pengadaan bahan dilakukan analisis kebutuhan material untuk memastikan kesesuaian jenis dan jumlah bahan yang akan digunakan sehingga meminimalkan kesalahan dalam proses pengadaan.

f. Proses manufaktur (pembuatan alat)

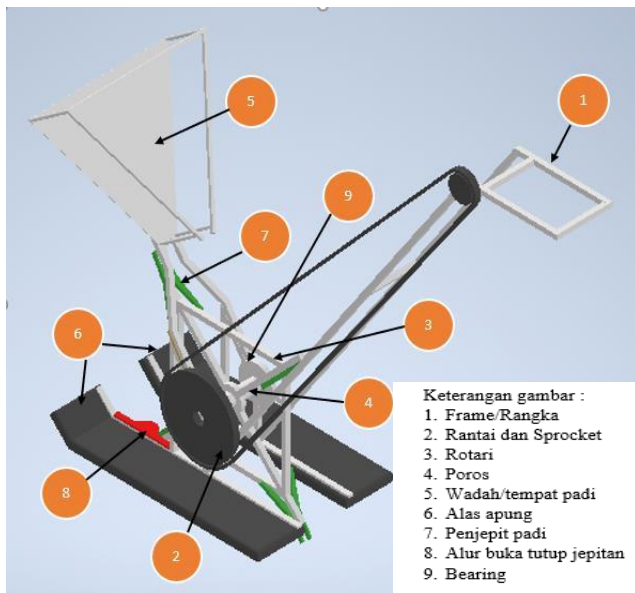
Proses pembuatan dilakukan berdasarkan gambar kerja yang telah direncanakan sebelumnya. Tahap ini diawali dengan persiapan peralatan kerja yang diperlukan selama proses produksi berlangsung [11].

g. Perakitan dan tahap akhir (*finishing*)

Tahap perakitan dilakukan dengan menggabungkan seluruh komponen hingga membentuk satu kesatuan sistem mekanisme yang dapat berfungsi dengan baik. Setelah itu dilakukan proses *finishing* untuk menyempurnakan hasil akhir alat.

h. Pengujian alat

Tahap pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja alat hasil perancangan. Apabila alat dapat berfungsi dengan baik, maka dilanjutkan dengan pengujian perbandingan antara proses penanaman padi menggunakan alat dan metode manual. Namun, jika alat belum bekerja secara optimal, maka dilakukan perbaikan desain sebelum dilakukan pengujian ulang. Desain Rancangan Alat tanam padi dengan sistem gerak putaran ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Desain rancangan alat tanam padi dengan sistem gerak putaran

2.2. Analisis Data

Penelitian diawali dengan penetapan desain alat berbasis gerak melingkar yang terintegrasi dengan sistem penanaman. Tahap ini meliputi analisis kinerja mekanisme putar terhadap efisiensi tanam serta evaluasi komparatif antara alat dengan metode konvensional. Prototipe ini dirancang untuk menggunakan bibit hasil persemaian tradisional, tanpa memerlukan media tanam khusus.

Proses diawali dengan identifikasi masalah melalui observasi lapangan guna memahami kebutuhan petani, dilanjutkan dengan kajian mendalam terhadap keunggulan, kelemahan, dan tantangan dalam praktik penanaman manual yang masih dominan. Alat ini beroperasi melalui sistem transmisi putar yang diawali dengan gerakan spindle. Putaran tersebut dialirkan melalui rantai penggerak ke *sprocket* yang terhubung langsung dengan as utama dan komponen rotari. Ketika as berrotasi, seluruh unit rotari ikut berputar menciptakan pola gerakan melingkar yang konsisten [12].

Pada mekanisme ini, unit penjepit yang terpasang pada rotari akan bergerak secara periodik. Saat mencapai posisi atas, penjepit akan berinteraksi dengan mekanisme pembuka yang memungkinkannya mengambil bibit padi dari wadah penyimpanan. Selanjutnya ketika mencapai titik bawah, sistem pelepasan otomatis akan mengaktifkan penjepit untuk melepas bibit ke media tanam. Siklus ini akan terus berlangsung secara berulang hingga seluruh area lahan tertanami [13].

Prototipe alat tanam padi ini masih memiliki beberapa keterbatasan operasional. Pertama, kapasitas penyimpanan bibit relatif terbatas akibat ukuran prototipe yang masih berskala kecil [14]. Kondisi ini membatasi jangkauan penanaman hanya sekitar 20-25 meter per pengisian, sehingga memerlukan pengisian ulang bibit secara berkala [15]. Kedua, alat memerlukan kondisi lahan yang benar-benar bersih dari sisa tanaman karena residu jerami atau akar padi yang tertinggal dapat menyebabkan penyumbatan pada mekanisme penjepit selama operasi penanaman berlangsung [16].

3. Hasil dan Pembahasan

Evaluasi kinerja alat dilakukan pada area persawahan yang telah dipersiapkan dengan luas petak uji 100 m². Pengujian dilakukan dengan membandingkan metode tanam manual dan penggunaan alat tanam circular. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan untuk meningkatkan validitas data.

Parameter pengujian meliputi waktu tanam, konsistensi jarak tanam aktual, jumlah bibit per titik tanam, serta kedalaman tanam bibit pada kondisi lahan sawah berlumpur.

- Panjang area uji: 10 meter (lari)
- Jarak antar tanaman: 30 cm
- Alat ukur: *Stopwatch*

Untuk memastikan validitas data, proses pengujian diulang sebanyak 10 kali pengamatan. Hal ini memungkinkan kami memperoleh perbandingan akurat antara durasi penanaman manual dan mekanis. Perbandingan penanaman padi tanpa alat dan dengan alat ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan penanaman padi tanpa alat dan dengan alat

No	Tanpa alat (Menit)	Dengan alat (Menit)
1	23,73	13,47
2	24,66	13,41
3	23,23	13,56
4	24,02	14,16
5	24,09	13,34
6	24,54	13,57
7	23,77	13,88
8	24,06	14,43
9	23,65	13,47
10	24,01	12,99

1. Efisiensi Waktu Penanaman

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh rata-rata waktu tanam sebagai berikut:

- Metode manual: ± 24 menit / 100 m²
- Menggunakan alat: $\pm 13,6$ menit / 100 m²

Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi waktu sebesar ± 43 –50%. Peningkatan efisiensi ini dipengaruhi oleh sistem gerak rotasi kontinu yang memungkinkan proses tanam berlangsung tanpa jeda gerakan seperti pada sistem tandur manual. Selain itu, penggunaan alat juga mengurangi kelelahan petani karena posisi kerja lebih tegak dibandingkan metode tanam tradisional.

2. Konsistensi Jarak Tanam Aktual

Target jarak tanam dirancang sebesar 30 cm. Berdasarkan pengukuran lapangan diperoleh:

- Rata-rata jarak tanam aktual : 29,2 – 31,4 cm
- Deviasi rata-rata : $\pm 1,2$ cm

Variasi jarak tanam dipengaruhi oleh:

- Slip roda pada lumpur sawah
- Kecepatan dorong petani

- Stabilitas putaran mekanisme penanam

Secara umum, nilai deviasi masih dalam batas toleransi pola tanam sawah tradisional.

3. Konsistensi Jumlah Bibit per Lubang Tanam

Hasil pengamatan menunjukkan:

- Target bibit: 2–3 bibit per lubang
- Hasil aktual rata-rata: 2,1 – 3,2 bibit per lubang
- Tingkat keberhasilan distribusi bibit seragam: $\pm 85\text{--}90\%$

Ketidakkonsistenan jumlah bibit disebabkan oleh:

- Variasi ukuran bibit padi
- Kondisi lumpur yang mempengaruhi penetrasi penjepit
- Sinkronisasi bukaan penjepit dengan posisi tanam

Namun secara umum alat masih mampu mempertahankan jumlah bibit dalam rentang optimal pertumbuhan padi.

4. Kedalaman Tanam Bibit

Target kedalaman tanam dirancang sebesar 30–50 mm. Hasil pengujian menunjukkan:

- Kedalaman tanam aktual: 28 – 52 mm
- Rata-rata kedalaman tanam: ± 40 mm

Variasi kedalaman tanam dipengaruhi oleh:

- Kepadatan lumpur sawah
- Tekanan dorong petani
- Stabilitas posisi alat saat penetrasi tanah

Kedalaman tanam ini masih sesuai dengan standar penanaman bibit padi untuk mendukung pertumbuhan akar awal.

5. Analisis Performa Mekanisme Circular

Mekanisme circular menunjukkan keunggulan pada:

- Kontinuitas siklus tanam
- Stabilitas gerakan penanam
- Sinkronisasi gerak putar dengan laju maju alat

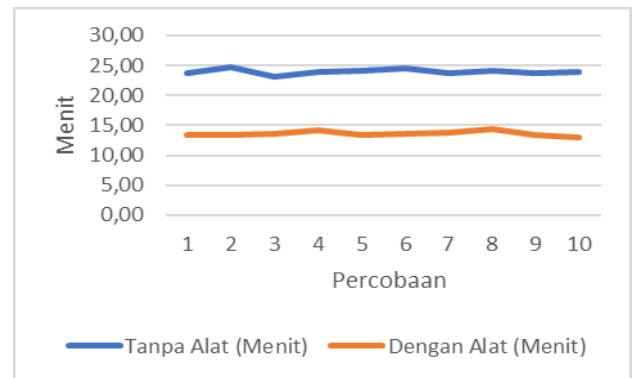
Namun masih terdapat potensi pengembangan pada:

- Sistem stabilisasi roda pada lumpur lunak
- Optimalisasi desain penjepit bibit
- Penyesuaian rasio transmisi untuk kondisi lumpur berbeda

Secara keseluruhan, alat tanam padi sistem circular menunjukkan performa yang baik dalam meningkatkan efisiensi waktu kerja serta menjaga kualitas hasil tanam. Dibandingkan metode manual, alat mampu mengurangi waktu kerja hampir setengahnya, sekaligus mengurangi beban kerja fisik petani. Dari sisi kualitas tanam, alat mampu menjaga konsistensi jarak tanam, jumlah bibit, serta kedalaman tanam dalam batas toleransi operasional pertanian sawah tradisional. Variasi yang terjadi masih dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kondisi lumpur sawah dan faktor petani. Pengembangan lebih lanjut diperlukan terutama pada sistem mekanisme penjepit bibit dan stabilitas alat saat beroperasi pada kondisi lumpur yang lebih lunak.

Analisis data menunjukkan perbedaan signifikan dalam efisiensi waktu antara metode penanaman. Penggunaan alat menghasilkan waktu tanam yang 50% lebih cepat dibandingkan cara manual. Faktor penyebab perbedaan ini terutama berasal dari karakteristik penanaman tradisional yang menggunakan teknik tandur (sistem tanam mundur) dengan posisi tubuh membungkuk, sehingga membutuhkan

jeda untuk peregangan otot di sela-sela aktivitas penanaman. Perbandingan penanaman padi tanpa alat dan dengan alat ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Kurva perbandingan penanaman padi tanpa alat dan dengan alat

Berdasarkan evaluasi grafik komparatif antara metode manual dan mekanis, diperoleh temuan bahwa alat tanam sistem gerak putaran mampu mengurangi waktu penanaman hingga 50% sekaligus menurunkan beban kerja petani pada lahan uji seluas 100 m² dengan jarak tanam 30 cm. Namun, prototipe ini masih menunjukkan beberapa keterbatasan, terutama dalam hal:

1. Ketidakmampuan menyesuaikan jumlah bibit per titik tanam
2. Tingkat kegagalan tanam tertentu yang disebabkan oleh faktor teknis alat yang masih dalam tahap pengembangan
3. Fleksibilitas penyesuaian selama proses tanam berlangsung
4. Sementara itu, metode konvensional memerlukan 2-4 tenaga kerja untuk mencapai kecepatan tanam yang sebanding, dengan keunggulan utama berupa:
 - a. Presisi dalam pengaturan jumlah bibit per lubang tanam
 - b. Minimnya risiko kegagalan penanaman

4. Kesimpulan

Dibandingkan metode tradisional, alat tanam padi dengan sistem gerak putaran mampu mengurangi waktu penanaman hingga 50%, meningkatkan efisiensi dan produktivitas secara signifikan. Namun, alat ini belum sempurna karena kesulitan mengendalikan jumlah benih yang tertanam. Adanya perbedaan antara benih yang tumbuh dan yang gagal menunjukkan bahwa alat ini belum mencapai tingkat keseragaman yang optimal. Faktor eksternal seperti lingkungan dan jenis tanah juga mungkin berperan dalam hasilnya.

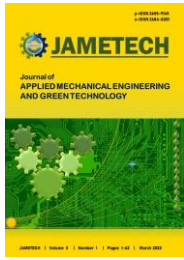
Ucapan Terima Kasih

Penulis dapat menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan atau dukungan dari teman sejawat, atau teknisi yang telah membantu menyelesaikan tugas tertentu.

Daftar Pustaka

- [1] S. H. Susilowati, "Fenomena Penuaan Petani dan Berkurangnya Tenaga Kerja Muda serta

- Implikasinya bagi Kebijakan Pembangunan Pertanian,” *Forum Penelit. Agro Ekon.*, vol. 34, no. 1, hal. 35, 2016, doi: 10.21082/fae.v34n1.2016.35-55.
- [2] G. Wirata, *Perubahan Alih Fungsi Lahan Persawahan Dan Implikasinya*. 2013. [Daring]. Tersedia pada: <http://www.nber.org/papers/w16019>
- [3] R. Saferi, A. Yanto, dan A. Bintarnel, “Pengembangan Desain Alat Tanam Bibit Padi dengan Metode Quality Function Deployment Design Development of Rice Transplanter with Quality Function Deployment Method,” *J. Tek. Mesin Inst. Teknol. Padang*, vol. 12, no. 1, hal. 51–60, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://jtm.itp.ac.id/index.php/jtm>
- [4] R. A. Nabawi, Syahril, Salmat, J. Suprianto, dan Mulianti, “Teknologi Tepat Guna Alat Tanam Padi Untuk Membantu Petani,” *J. Areasi*, vol. 1, no. 1, hal. 37–41, 2019.
- [5] Tuti Supatminingsih, “Peranan Sumber Daya Manusia dalam Mewujudkan Pertanian Indonesia yang Unggul,” *J. Econ. Educ. Entrep. Stud.*, vol. 3, no. 1, hal. 241–252, 2022, doi: 10.26858/je3s.v3i1.101.
- [6] D. Widayat dan C. O. Purba, “Produktivitas tanaman dan kehilangan hasil tanaman padi (*Oryza sativa* L.) kultivar Ciherang pada kombinasi jarak tanam dengan frekuensi penyiangan berbeda,” *Kultivasi*, vol. 14, no. 1, hal. 17–24, 2015, doi: 10.24198/kltv.v14i1.12098.
- [7] P. Sanjaya, W. Tika, dan Sumiyati, “Pengaruh Teknik Budaya Sri (System Of Rice Intensification) Dan Legowoterhadap Iklim Mikro,” no. 1, hal. 1–10, 2018.
- [8] T. Sarkin, “Pembelajaran 4. GERAK MELINGKAR,” *Calon guru*, hal. 51–56, 2020.
- [9] F. Hidayat Ahmad, “337375-Rancang-Bangun-Sistem-Informasi-Penyewaa-9D89D8D2,” *J. Sist. Inf. dan Sains Teknol.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–9, 2019.
- [10] A. J. Sinaga dan C. Manurung, “Analisa Laju Korosi dan Kekerasan Pada Stainless Steel 316 L Dalam Larutan 10 % NaCl Dengan Variasi Waktu Perendaman,” *Sprocket J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 2, hal. 92–99, 2020, doi: 10.36655/sprocket.v1i2.186.
- [11] S. Khoiriah, “Desain Dan Analisis Kekuatan Pada Ladder Frame Chassis Kendaraan Hybrid Elektrik-Pneumatik Menggunakan Software Autodesk Inventor Professional 2017,” hal. 1–123, 2020.
- [12] Anonim, “Dasar Teori Bearing,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, hal. 11, 2013.
- [13] M. R. ABDILLAH, “Rancang Bangun Alat Angkut Komponen Engine Dan Tools Bertenaga Motor Listrik Dengan Fitur Penaik Tangga (Biaya Produksi),” *Ranc. Bangun Alat Angkut Kompon. Engine Dan Tools Bertenaga Mot. List. Dengan Fitur Penaik Tangga (Biaya Produksi)*, hal. 6–35, 2018.
- [14] M. Fatori, “Peralatan Dan Mesin Pengerjaan Kayu Kurikulum 2013,” *Kementrian Pendidik. Dan Kebud. Direktorat Pembn. Sekol. Menengah Kejuru*. 2013, hal. 184, 2013.
- [15] D. D. Prasetyo dan N. A. Ariyanto, “Pembuatan poros roda mesin penggembur tanah 123,” hal. 2–4, 2021.
- [16] B. A. B. Ii dan T. Pustaka, “BAB II Tinjauan Pustaka BAB II TINJAUAN PUSTAKA 2.1,” hal. 1–64, 2002.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Analisis Pengaruh Aliran Fluida Pendingin dan Waktu Pengelasan *Spot Welding* Kw14-1031 Terhadap Kekuatan Tarik Pelat Baja ST 40

I Made Anom Adiaksa^{1*}, I Nyoman Gede Suta Waisnawa¹, Ida Bagus Gde Widiantera¹ dan I Wayan Marlon Managi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80361, Indonesia

*Email: madeanomadiaksa@pnb.ac.id

Abstrak

Pengelasan spot welding sangat dipengaruhi oleh media pendingin dalam hal karakteristik hasil pengelasan seperti kekuatan. Kekuatan tarik dari sambungan las plat baja ST 40 dipengaruhi oleh media pendingin dan waktu pengelasan. Pengujian dan pengambilan data menggunakan metode eksperimental pada mesin *spot welding* dan *shear test*. Pengumpulan data menggunakan metode kuantitatif sedangkan pengolahan menggunakan metode deskriptif. Standar ASTM E8 digunakan dalam pengujian sampel. Aliran fluida pendingin dalam proses pengelasan titik secara signifikan mempengaruhi diameter HAZ. Aliran fluida yang lebih cepat meningkatkan transfer panas dari elektroda ke pendingin, menjaga suhu elektroda dan material las di bawah 1.500 °C, sehingga mengurangi keausan elektroda dan mempertahankan ukuran *nugget* las yang stabil pada 5,00 mm. Diameter HAZ terendah tercatat pada aliran 5 liter/menit dengan diameter HAZ 8,30 mm, sedangkan tertinggi pada aliran 2 liter/menit dengan diameter 10,43 mm. Pendinginan yang terlalu cepat atau waktu pengelasan yang terlalu singkat dapat menyebabkan sambungan las yang rapuh dan menurunkan tegangan tarik. Sebaliknya, pendinginan yang lebih lambat dengan waktu pengelasan yang tepat menghasilkan kekuatan tarik yang optimal dengan mempertahankan integritas struktural sambungan. Hasil optimal ditemukan pada laju aliran fluida 2 liter/menit pada 5,0 detik dengan tegangan tarik 96,10 Mpa, 3 liter/menit pada 6,0 detik dengan tegangan tarik 104,89 Mpa, 4 liter/menit pada 7,0 detik dengan tegangan tarik 114,00 Mpa dan 5 liter/menit pada 8,0 dan 9,0 detik dengan tegangan tarik 116,72 Mpa dan 125,76 Mpa.

Kata kunci: fluida, pendingin, spot, welding, kekuatan, tarik

Abstract: Spot welding is greatly influenced by the cooling medium in terms of welding characteristics such as strength. The tensile strength of ST 40 steel plate welded joints is influenced by the cooling medium and welding time. Testing and data collection use experimental methods on spot welding machines and shear tests. Data collection uses quantitative methods while processing uses descriptive methods. The ASTM E8 standard is used in sample testing. The flow of coolant fluid in the spot welding process significantly affects the HAZ diameter. Faster fluid flow increases heat transfer from the electrode to the coolant, keeping the electrode and weld material temperatures below 1,500 °C, thereby reducing electrode wear and maintaining a stable weld nugget size at 5.00 mm. The lowest HAZ diameter was recorded at a flow rate of 5 liters/minute with a HAZ diameter of 8.30 mm, while the highest was at a flow rate of 2 liters/minute with a diameter of 10.43 mm. Too fast cooling or too short welding time can cause brittle weld joints and reduce tensile stress. Conversely, slower cooling with appropriate welding time produces optimal tensile strength while maintaining the structural integrity of the joint. Optimal results were found at a fluid flow rate of 2 liters/minute at 5.0 seconds with a tensile stress of 96.10 MPa, 3 liters/minute at 6.0 seconds with a tensile stress of 104.89 MPa, 4 liters/minute at 7.0 seconds with a tensile stress of 114.00 MPa and 5 liters/minute at 8.0 and 9.0 seconds with tensile stress of 116.72 MPa and 125.76 MPa.

Keywords: fluid, coolant, spot, welding, strength, tensile

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Bidang konstruksi dan manufaktur Teknik pengelasan sangat luas penggunaannya meliputi konstruksi jembatan, perkapalan, industri karoseri dan sebagainya. Proyek infrastruktur modern membutuhkan Teknik penyambungan material yang tepat untuk mencapai hasil

yang dibutuhkan. Metode pengelasan yang tepat memastikan kekuatan dan kestabilan struktur yang vital untuk menahan beban berat dan kondisi lingkungan ekstrem. Metode pengelasan yang tepat memungkinkan pembuatan badan kapal yang kedap air, kuat, dan tahan terhadap korosi air laut pada sektor perkapalan. Pengelasan juga dilakukan untuk merakit bodi kendaraan

yang aman dan kokoh pada industri karoseri. Metode pengelasan memungkinkan para insinyur dan perancang untuk menciptakan struktur yang kompleks dan efisien. Pembuatan pipa saluran gas dan minyak, produksi bejana tekan di industri kimia, hingga perakitan rangka bangunan bertingkat juga mengaplikasikan metode pengelasan untuk penyambungan. Keterampilan dan teknologi pengelasan dalam mendukung kemajuan industri global sangat esensial dalam aplikasi yang lebih luas. Faktor kunci dalam menjamin keamanan dan umur panjang produk yang dibuat dipengaruhi oleh keandalan hasil pengelasan. Metode dan bahan las yang tepat sangat penting dalam setiap proyek untuk dapat menjaga kualitas dari suatu produk. Pengelasan dalam ilmu metalurgi merupakan sambungan logam paduan yang dilakukan dalam keadaan lumer atau cair disebut sebagai pengelasan [1]. Struktur logam induk setelah proses pengelasan akan melibatkan suhu tinggi yang digunakan untuk melelehkan bagian logam induk ataupun logam pengisi [2]. Las titik atau *spot welding* merupakan proses penyambungan logam atau non logam yang dilakukan dengan memanaskan material yang akan akan disambung hingga temperatur las yang dilakukan dengan cara menggunakan tekanan (*pressure*), dan tanpa menggunakan logam pengisi (*filler*) [3]. Penggunaan suhu tinggi mengakibatkan material logam induk (base metal) mengalami perubahan sifat mekanisnya maka perlu dilakukan pendinginan. Perubahan struktur yang mengakibatkan perubahan sifat mekanis dan sifat fisik logam terjadi akibat proses pendinginan. Perbaikan cacat logam pada hasil pengecoran material dan mempertebal logam yang aus juga dapat dilakukan dengan proses pengelasan [4]. Las titik populer dipergunakan pada pengelasan dalam industri otomotif terutama produksi mobil untuk pengerjaan *body* atau kerangka mobil. Penyambungan pelat logam tipis dapat dilakukan dengan sangat cepat, efisien, dan memiliki tingkat presisi yang tinggi dilakukan dengan las titik. Ribuan titik las diaplikasikan pada satu unit kendaraan untuk memastikan struktur kabin tetap kokoh namun tetap ringan dilakukan pada perakitan kendaraan modern. Penggunaan las titik juga memungkinkan proses produksi dilakukan secara otomatis menggunakan robotik memberikan kekuatan struktural yang optimal dalam menjaga keselamatan penumpang untuk mendapatkan hasil pengerjaan lebih konsisten dibandingkan metode konvensional lainnya.

Spot welding atau pengelasan titik menggunakan arus listrik untuk proses penyambungan dua atau lebih permukaan logam [5]. Las titik (*Spot Welding*) merupakan salah satu metode pengelasan dengan prinsip kerja menggunakan arus listrik untuk penyambungan pelat logam [6]. Pedal ditekan agar logam yang akan dilas terjepit oleh sepasang elektroda yang terbuat dari bahan paduan tembaga dengan aliran arus listrik besar dalam waktu singkat. Arus yang bertegangan tinggi ini akan membuat logam yang bersinggungan menjadi panas dan suhunya naik mencapai suhu titik lebur material. Resistansi atau hambatan listrik dari logam diandalkan dalam proses penyambungan material. Logam mencair dan menyatu akibat dari arus dialirkan melalui elektroda tembaga menimbulkan panas sangat tinggi terkonsentrasi pada satu titik tertentu. Metode ini sangat efektif untuk meminimalisir perubahan bentuk atau distorsi pada

permukaan pelat karena panas hanya terfokus pada area yang sempit. *Spot welding* menjadi standar yang tepat dalam industri manufaktur massal yang membutuhkan kecepatan tinggi tanpa mengorbankan kekuatan sambungan.

Sambungan akan terbentuk akibat suhu pengelasan telah tercapai dan memaksa logam induk menyatu akibat tekanan diantara. Waktu akan menghentikan arus tetapi masih dilakukan penekanan. Tekanan dilepaskan setelah logam mendingin. Pencegahan elektrode tembaga agar tidak meleleh dan menempel pada permukaan logam dilakukan dengan memberikan air pendingin yang bersirkulasi. Sirkulasi air pendingin pada ujung elektroda juga mempercepat pendinginan pada logam yang bertujuan untuk memperbaiki struktur mikro dari logam tersebut kualitasnya dapat dipertahankan. Perancangan, umur pakai dan keamanan dari suatu kendaraan sangat dipengaruhi oleh kualitas dan kekuatan dari proses las titik [7]. Prosesnya yang mudah, ekonomis, dan cepat sangat cocok untuk produksi massal, suplai panas yang diberikan cukup akurat, sifat mekanik hasil las hampir menyerupai logam induk dan tidak memerlukan kawat las. Kualitas hasil las yang optimal, seperti kekuatan tarik dan kekuatan akibat pengaruh beban dari luar dipengaruhi oleh pengontrolan pada media pendingin yang berpengaruh pada karakteristik hasil pengelasan [8]. Media pendingin dan waktu pengelasan menjadi tolak ukur untuk menentukan kekuatan tarik dari sambungan las plat baja. Waktu pengaliran arus listrik secara langsung mengontrol besarnya masukan panas (*heat input*) yang membentuk diameter sambungan atau HAZ, sedangkan media pendingin menentukan laju penurunan suhu yang mempengaruhi struktur mikro logam. Sambungan tidak akan menyatu dengan sempurna apabila waktu pengelasan terlalu singkat. Logam berisiko mengalami deformasi atau retak apabila waktu pengelasan terlalu lama. Media pendingin yang tepat digunakan seperti udara, air, atau oli. Media pendingin yang tepat akan mengatur tingkat kekerasan dan keuletan material setelah proses pengelasan. Kombinasi yang presisi antara waktu pengelasan dengan media pendingin menjadi kunci dalam mencapai standar kekuatan tarik yang optimal pada konstruksi baja. Proses pengelasan material kerja yang di las dalam skala besar dipengaruhi oleh penempatan sistem pendingin pada *spot welding*. ST 40 merupakan bahan atau material yang sering digunakan pada penyambungan material beda jenis dalam dunia industri digunakan dalam penelitian [9]. Pelat baja ST 40 dalam las titik dipergunakan karena bahan tersebut tahan terhadap korosi, mudah dibentuk dan di las, tahan terhadap temperatur panas tinggi maupun rendah, dan desain produk yang sangat berkualitas [10]. Baja ST 40 memiliki karakteristik yang memberikan keseimbangan antara kekuatan Tarik dan fleksibilitas sehingga sangat ideal untuk dijadikan komponen yang memerlukan presisi tinggi seperti bodi kendaraan atau peralatan industri. Sambungan las tidak mudah getas atau mengalami pemuaihan yang ekstrem karena kemampuan baja ST 40 ini tetap stabil dalam berbagai kondisi suhu. Risiko cacat las pada material dapat diminimalisir dengan sifat *weldability*. Efisiensi produksi dan estetika produk akhir secara keseluruhan dapat dicapai dengan penggunaan material baja ST 40.

Sifat mekanik dari sambungan baja tersebut didapatkan dengan melakukan pengujian tarik pada material yang telah dilas. Parameter penting seperti tegangan maksimum (*ultimate tensile strength*), titik luluh (*yield point*), dan elastisitas sambungan dapat diperoleh dengan melakukan metode pengujian tarik. Spesimen uji diberikan beban tarikan secara bertahap hingga putus guna melihat apakah kegagalan terjadi pada titik las atau pada area logam induk di sekitarnya. Prosedur pengelasan yang diterapkan telah memenuhi standar keamanan dan spesifikasi teknis yang dibutuhkan sebelum komponen tersebut digunakan secara luas dalam konstruksi atau industri otomotif diperoleh dari data pengujian tarik yang sudah divalidasi. Proses validasi ini akan mendapatkan parameter pengelasan mulai dari kuat arus hingga durasi penekanan dipastikan mampu menghasilkan sambungan yang tangguh dan reliabel. Bukti empiris bahwa integritas struktural material berada di atas ambang batas minimum yang diizinkan untuk meminimalisir risiko kegagalan fatal saat kendaraan atau bangunan menerima beban mekanis yang dinamis ditunjukkan dengan data uji tarik. Hasil pengujian laboratorium dan penerapan di lini produksi harus disinkronisasi untuk menjadi jaminan mutlak bagi kualitas dan keselamatan produk akhir.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang di bahas pada penelitian berdasarkan latar belakang tersebut yaitu:

1. Apakah variasi aliran fluida pendingin berpengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan material setelah proses *spot welding*.
2. Apakah waktu pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan tarik pada sambungan material setelah proses *spot welding* dengan adanya aliran fluida pendingin.

1.3. Tujuan

Tujuan dari analisis pengaruh aliran fluida pendingin dan waktu pengelasan terhadap kekuatan tarik pada material setelah proses *spot welding* adalah:

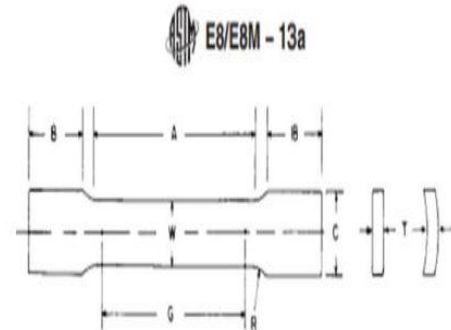
1. Dapat mengetahui aliran fluida pendingin berpengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan material setelah proses *spot welding*.
2. Dapat mengetahui waktu pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan tarik pada sambungan material setelah proses *spot welding* dengan adanya aliran fluida pendingin.

2. Metode dan Bahan

2.1. Benda Uji

Metode eksperimental digunakan dalam pengujian dan pengambilan data pada mesin *spot welding* dan *shear test*. Standar uji geser ASTM E8 sebagai syarat digunakan membentuk bahan plat baja ST 40 untuk melakukan pengujian tarik seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Metode untuk pengujian tarik bahan logam menggunakan Standar ASTM E8/E8M. *American Society For Testing And Material* (ASTM) mengembangkan ASTM E8/E8M yang merupakan standar pengujian untuk spesiemen berbentuk pelat [11]. Sifat material logam digambarkan secara khusus dengan standar ASTM. Penentuan *yield point*, pemanjangan titik luluh, *tensile strength*, *strain at break*, dan *reduction area* dijelaskan dalam standar

ASTM E8/E8M tentang pengujian tarik uniaksial logam pada suhu kamar. ASTM E8/E8M membuat prediksi nilai-nilai penting tentang kekuatan dan ketangguhan material. Satuan pengukuran inci dan pon digunakan dalam ASTM E8, sementara ASTM E8M menggunakan satuan SI. Nilai karakteristik yang ditentukan dengan satu sistem satuan tidak persis sama dengan yang ditentukan dengan sistem satuan lainnya.



Keterangan	Panjang (mm)
<i>Gage Length (G)</i>	50
<i>Length Of Reduced Section (A)</i>	57
<i>Widht (W)</i>	12,5
<i>Thickness (T)</i>	1-10
<i>Radius Of Filler (R)</i>	12,5
<i>Overall Length (L)</i>	200
<i>Widht Of Grip Section (C)</i>	20

Gambar 1. Standar ASTM E8M benda uji tarik

Analisis ini menggunakan mesin *ultimate testing machine* untuk pengambilan data. Spesimen ini dibuat dari dua buah plat baja yang sama, dengan ukuran masing-masing plat sebagai berikut: panjang 225 mm, lebar daerah yang dijepit mesin 50 mm, panjang daerah pegangan yang dijepit mesin 75 mm, ketebalan 1,1 mm, lebar daerah yang tidak dijepit mesin 30 mm, panjang daerah yang tidak dijepit mesin 150 mm, dengan radius 25°. kedua plat baja tersebut ditumpuk yang disebut sambungan tumpuk (*lap joint*) dengan ukuran tumpang tindih (*overlap*) 50 mm. Lebar daerah yang tidak dijepit mesin tetap 30 mm, panjang daerah yang tidak dijepit mesin menjadi 250 mm, ketebalan menjadi 2,2 mm, dan panjang keseluruhan menjadi 400 mm.

Jumlah specimen untuk setiap variable adalah 10 buah. Variable tetap adalah aliran fluida pendingin yang ditunjukkan dalam *flow meter* dengan skala 2,3,4,5 liter/menit. Waktu setiap pengelasan diseting pada alat *spot welding* dengan interval waktu 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 detik. Arus pengelasan yang dipergunakan sebesar 75 A. Elektroda menggunakan tembaga dengan penekanan 10 kg. Variable bebas dari penelitian adalah kekuatan tarik hasil pengelasan.

Metode kuantitatif dipergunakan untuk mengumpulkan data yang diperlukan dalam penelitian serta pengolahan menggunakan metode deskriptif. Fenomena yang sedang diteliti menggunakan pendekatan ini karena mendapatkan gambaran yang objektif dan terukur. Data yang telah terkumpul selanjutnya dilakukan langkah klasifikasi dan tabulasi agar informasi lebih mudah dibaca. Metode analisis deskriptif merupakan metode analisa dengan mendeskripsikan data yang telah ditampilkan dalam bentuk grafik [12]. Visualisasi tersebut

menggambarkan pola perkembangan atau perbandingan antar variabel dapat terlihat dengan lebih jelas dan sistematis. Hasil pengujian dibuatkan grafik untuk melihat pengaruh arus terhadap kekuatan geser hasil pengelasan. Distribusi frekuensi maupun nilai rata-rata dari populasi yang diuji digambarkan dengan grafik untuk mempermudah dalam membaca dan memahami. Analisis deskriptif dipergunakan untuk dapat menggambarkan kekuatan geser yang didapatkan. Fondasi yang kuat bagi validitas hasil penelitian secara keseluruhan didapatkan dengan integrasi antara data kuantitatif dan analisis deskriptif. Informasi yang disajikan menjadi sebuah narasi ilmiah yang didasarkan pada fakta empiris yang akurat serta tidak hanya berupa angka mati.

2.2. Perhitungan Tegangan Tarik

Nilai yang dituliskan sebagai hasil uji tarik tetapi pada kenyataannya nilai tersebut kurang bersifat mendasar dalam kaitannya dengan kekuatan bahan sering disebut sebagai tegangan tarik. Beban maksimum dimana material dapat menahan beban sesumbu untuk keadaan yang sangat terbatas harus ditahan dengan logam yang memiliki elastisitas tinggi. Hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang pada spesimen disebut dengan daerah *linier* atau *linear zone* uji tarik [13]. Hukum *Hooke* mengatur tentang kurva pertambahan panjang dengan beban disebut dengan rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) yang bersifat konstan. Beban dibagi luas penampang bahan disebut dengan *stress*, sedangkan pertambahan panjang (L_1) dibagi panjang awal bahan (L_0) disebut dengan *strain*. *Destructive* dan *non destructive testing* dapat dilakukan pada sambungan logam hasil pengelasan [14]. Kekuatan sambungan logam hasil pengelasan diuji dengan uji tarik yang telah distandarisasi dapat dilakukan dengan *destructive test*. Sifat logam induk, daerah *heat affected zone* (HAZ), sifat logam tambah las, dan geometri serta distribusi tegangan dalam sambungan las mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las. Pengujian spesimen dengan kenaikan beban meningkat secara perlahan dan konstan hingga spesimen uji tersebut patah, nilai uji tarik dapat dihitung dengan rumus. Besarnya beban tarik yang diberikan terhadap spesimen uji beserta skala perpanjangan (*elongation*) yang terjadi pada spesimen akan tercatat oleh mesin uji tarik. *Load cell* merupakan alat pencatat beban tarik, sedangkan *extensometer* merupakan alat pencatat perpanjangan yang terjadi. Kurva diperoleh dari hasil pencatatan tegangan yang membujur rata-rata dari pengujian tarik serta pertambahan panjangnya. Pembagian beban yang diberikan dengan luas awal penampang benda uji merupakan tegangan tarik diperoleh dengan cara seperti dalam persamaan berikut [15]:

$$A = \text{Lebar pelat} \times \text{Tebal pelat} \quad (1)$$

Sedangkan tegangan tarik didapat dengan rumus:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

dimana

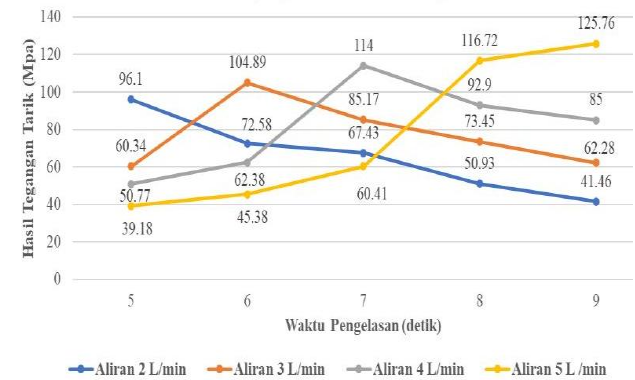
σ = Tegangan tarik maksimum (MPa)

F = Kekuatan tarik (N)

A_0 = Luas awal dari penampang batang uji (mm²)

Universal testing machine digunakan untuk pengujian material. Benda uji dicekam pada *universal testing machine*, beban statik naik secara bertahap hingga spesimen putus. *Plotter* yang terdapat dalam mesin uji tarik akan mencatat besarnya beban dan pertambahan panjang, sehingga diperoleh grafik tegangan (N/m² atau MPa) yang memberikan informasi data tegangan normal (σ), ketangguhan dan keuletan sambungan las yang diuji.

3. Hasil Pengujian

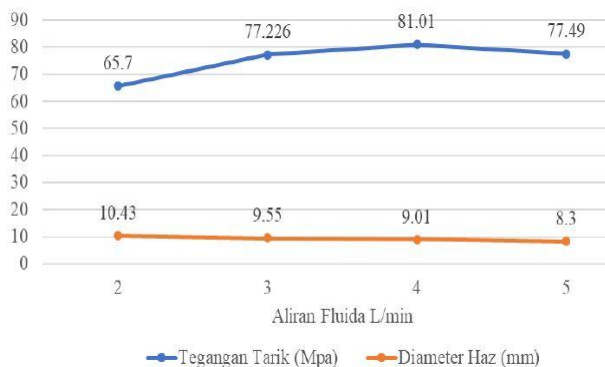


Gambar 2. Grafik tegangan tarik terhadap waktu pengelasan

Gambar 2 menunjukkan bahwa jika semakin tinggi hasil tegangan tarik pada bahan ST 40 tergantung pada pengontrolan laju aliran pendingin yang berbanding lurus terhadap waktu pengelasan yang tepat. Kombinasi aliran fluida dan waktu pengelasan yang bervariasi sangat berpengaruh pada hasil tegangan tarik (MPa). Semua rentang waktu yang diberikan menunjukkan tidak ada satu aliran fluida tunggal yang secara konsisten memberikan hasil tertinggi. Tegangan mencapai puncak pada waktu tertentu dipengaruhi oleh waktu pengelasan, sementara yang lain menurun. Hal tersebut dikarenakan pada saat pendinginan yang terlalu cepat atau waktu yang terlalu singkat yang menyebabkan sambungan yang rapuh dan titik leleh bahan saat proses pengelasan tidak tercapai mengakibatkan nilai dari tegangan tariknya sangat rendah begitu juga sebaliknya pendinginan yang lambat dan waktu pengelasan yang tepat membantu mencapai kekuatan tarik yang paling optimal dengan mempertahankan integritas struktural sambungan las [16].

Pada gambar 2 menyatakan bahwa laju aliran 2 liter/menit pada waktu pengelasan 5.0 detik dengan hasil tegangan tarik sebesar 96,10 MPa sudah optimal mendinginkan bahan ST 40 saat proses pengelasan dibandingkan dengan aliran fluida 3,4,5 liter/menit di waktu yang sama dan waktu pengelasan 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 di variasi fluida yang berbeda. Laju aliran 3 liter/menit pada waktu pengelasan 6.0 detik dengan hasil tegangan tarik sebesar 104,89 MPa sudah optimal mendinginkan bahan ST 40 saat proses pengelasan dibandingkan dengan aliran fluida 2,4,5 liter/menit di waktu yang sama dan waktu pengelasan 5.0, 7.0, 8.0, 9.0 di variasi fluida yang berbeda. Laju aliran 4 liter/menit pada waktu pengelasan 7.0 detik dengan hasil tegangan tarik sebesar 114,00 MPa sudah optimal mendinginkan bahan ST 40 saat proses pengelasan, dibandingkan dengan aliran fluida 2,3,5 liter/menit di waktu yang sama dan waktu pengelasan 5.0, 6.0, 8.0, 9.0 di variasi fluida yang berbeda. Laju aliran 5

liter/menit pada waktu pengelasan 8,0, 9,0 detik dengan hasil tegangan tarik sebesar 116,72 MPa dan 125,76 MPa sudah optimal mendinginkan bahan ST 40 saat proses pengelasan, dibandingkan dengan aliran fluida 2,3,4 liter/menit di waktu yang sama dan waktu pengelasan 5,0, 6,0, 7,0 di variasi fluida yang berbeda.



Gambar 3. Grafik HAZ dengan tegangan tarik

Gambar 3 terlihat perbandingan rata-rata HAZ dengan rata-rata tegangan tarik bahwa dengan meningkatnya aliran fluida, ketebalan HAZ cenderung menurun. Hal ini terjadi karena peningkatan aliran fluida membantu mendinginkan material lebih cepat, sehingga mengurangi ukuran HAZ [17]. Tegangan tarik material meningkat dengan peningkatan aliran fluida, mencapai nilai tertinggi pada aliran 4 L/min dengan rata-rata 9,01 agar material tetap terjaga struktur mikronya. Nilai terendah tercatat pada aliran 2 L/min dengan 65,7 MPa. Aliran fluida optimal untuk mencapai kekuatan Tarik maksimum pada aliran 4 L/min dengan 81,01 MPa. Tegangan Tarik justru mengalami penurunan Ketika aliran fluida pendingin ditingkatkan menjadi 5 L/min menjadi 77,49 MPa yang mengindikasikan titik jenuh atau penurunan efisiensi pada aliran yang lebih tinggi.

Material mengalami peningkatan kekuatan tarik saat HAZ mengecil, karena distribusi panas yang lebih merata dan pendinginan yang lebih efektif. Tegangan tarik tertinggi ditunjukkan dengan aliran fluida 4 L/min, sementara hasil diameter HAZ terkecil ditunjukkan pada aliran fluida 5 L/min. Hal ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara tegangan Tarik dengan diameter HAZ. Penyeimbangan kedua parameter ini berdasarkan prioritas aplikasi perlu dilakukan untuk mendapatkan kekuatan Tarik maksimum dengan meminimalis diameter HAZ. Pendinginan yang tepat akan menghasilkan diameter HAZ yang kecil sehingga kekuatan tarik menjadi maksimum. Hubungan negatif antara ukuran HAZ dan aliran fluida, serta hubungan positif antara aliran fluida dan tegangan tarik, menunjukkan bahwa pengaturan aliran fluida dapat mempengaruhi karakteristik material yang terpengaruh oleh proses panas. Distribusi panas yang lebih merata dan pendinginan yang lebih efektif menyebabkan pengecilan diameter HAZ. Proses penyambungan material seperti pengelasan, Fenomena ini menjadi krusial khususnya dalam ilmu metalurgi. Panas yang terkonsentrasi selama proses pengelasan secara lokal dan menyebar dengan cepat menyebabkan struktur mikro di sekitar sambungan cenderung tetap halus. Pertumbuhan butir (*grain growth*) yang berlebihan biasanya menyebabkan kerapuhan dapat dicegah dengan pendinginan yang lebih cepat. Kekuatan mekanis material

dasar dapat terjaga akibat zona yang terkena panas tidak meluas. Transformasi fasa yang diinginkan terjadi tanpa merusak area yang berdekatan akibat distribusi panas yang optimal. Kemampuan material untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen mencerminkan kekuatannya. Meminimalkan ukuran HAZ dapat dilakukan dengan mengontrol parameter aliran fluida pendingin atau kecepatan pengelasan. Sambungan yang lebih kuat dan lebih tahan lama dapat dicapai untuk memenuhi standar kualitas teknik yang ketat.

4. Kesimpulan

Aliran fluida pendingin dalam proses pengelasan titik secara signifikan mempengaruhi diameter HAZ. Aliran fluida yang lebih cepat meningkatkan transfer panas dari elektroda ke pendingin, membantu menjaga suhu elektroda dan material las di bawah 1.500 °C, sehingga mengurangi keausan elektroda dan mempertahankan ukuran *nugget* las yang stabil pada 5,00 mm. Diameter HAZ terendah tercatat pada aliran 5 liter/menit dengan diameter HAZ 8,30 mm, sedangkan tertinggi pada aliran 2 liter/menit dengan diameter 10,43 mm.

Pendinginan yang terlalu cepat atau waktu pengelasan yang terlalu singkat dapat menyebabkan sambungan las yang rapuh dan menurunkan tegangan tarik. Sebaliknya, pendinginan yang lebih lambat dengan waktu pengelasan yang tepat menghasilkan kekuatan tarik yang optimal dengan mempertahankan integritas struktural sambungan.

Hasil optimal ditemukan pada laju aliran fluida 2 liter/menit pada 5,0 detik dengan tegangan tarik 96,10 MPa, 3 liter/menit pada 6,0 detik dengan tegangan tarik 104,89 MPa, 4 liter/menit pada 7,0 detik dengan tegangan tarik 114,00 MPa dan 5 liter/menit pada 8,0 dan 9,0 detik dengan tegangan tarik 116,72 MPa dan 125,76 MPa

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan dan dukungan dari teman sejawat, teknisi dan mahasiswa yang telah membantu dalam proses pengambilan data. Ucapan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali dengan memberikan dukungan fasilitas dalam pengambilan data, pengolahan data maupun kesempatan untuk publikasi ilmiah hasil dari penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] S. I. Samudra, H. Widya Prasetya, D. I. Pratiwi, T. Mekanika Perekeretaapian, P. Perkeretaapian, and I. Madiun, "Pengaruh Variasi Arus Resistance Spot Welding Terhadap Kuat Tarik Material Stainless Steel 304 Kereta K1," vol. 9, no. 2, pp. 26–32, 2023.
- [2] I. Sofwan, Sugiyarto, and E. Erwanto, "Fenomena Las Gesek (Friction Welding) Dengan Variasi Waktu Gesek Pada Material AISI 1040 Dengan Kuningan," *J. Inov. Teknol. Terap.*, vol. 1, no. 2, pp. 374–382, 2023, doi: 10.33504/jitt.v1i2.45.
- [3] I. Iswanto, N. Noerdianto, A. Fachruddin, and M. Mulyadi, "Analisa perbandingan kekuatan hasil pengelasan TIG dan pengelasan MIG pada Aluminium 5083," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 87–92, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i1.1166.
- [4] A. D. Krisanggoro and S. Suheni, "Analisis

- Pengaruh Posisi Pengelasan Dan Besar Arus Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Makro Pada Proses Las Gmaw Dengan Material Baja A-36,” *Pros. SENASTITAN Semin. Nas. Teknol. Ind. Berkelanjutan III*, no. Senastitan Iii, pp. 4–8, 2023, [Online]. Available: <http://ejurnal.itats.ac.id/senastitan/article/view/4190>
- [5] M. A. Fitrah, M. Ikhsan, and H. H. Utami, “Analisis Leveled Surface Terhadap Diameter Nugget Las Pada Plat Stainless Steel 304 Proses Resistance Spot Welding (Rsw),” *J. Tematis (Teknologi, Manufaktur dan Ind.*, vol. 4, no. 2, pp. 2985–4946, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.politeknikbosowa.ac.id/index.php/TMT/article/view/414>
- [6] Lukmanul Hakim, “Pengaruh Pengelasan Smaw Terhadap Kekuatan Impak Dan Hardness Dengan Variasi Arus 80,90, Dan 100 Amper Pada Baja Stainles 308,” vol. 4, no. 2, pp. 1–7, 2020.
- [7] H. Haikal, “Pengaruh Parameter Pengelasan Resistance Spot Welding Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanik Multi-Layer Logam Tak Sejenis Berbeda Ketebalan,” *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 16–24, 2021, doi: 10.33019/jm.v7i1.1661.
- [8] R. Rasyid and N. S. Drastiawati, “Pengaruh Waktu Pengelasan Titik (Spot Welding) Terhadap Kekerasan, Kekuatan Geser Dan Diameter Nugget Pada Baja Spcen 1,6 Mm,” *Otopro*, vol. 16, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.26740/otopro.v16n1.p1-6.
- [9] R. Haq, “Analisa Kekuatan Tarik, Tekuk, dan Impak Pengelasan Flux Cored Arc Welding Material Baja St 40 Posisi 3G dengan Variasi Kuat Arus Listrik,” *Tek. Perkapalan, Univ. Diponegoro*, vol. 7, no. 4, pp. 184–193, 2020.
- [10] S. Budi Harjanto, D. Ricky Lumintang, “Analisis Pengaruh Heat Treatment 900°C Baja St40 Pada Body Truk Unimog Militer Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis,” *Mekanikasista*, vol. 11, no. 2, pp. 135–145, 2024.
- [11] W. Hendrawan and I. M. Anwar, “Pengujian Mesin Uji Tarik Hidrolik Manual Kapasitas 20 Ton,” *PRIME Publ. J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 40–52, 2024, doi: 94.617676/prime.v1.1.
- [12] I. P. Darmawa, I. M. A. Adiaksa, I. Bagus, P. Indra, and I. W. Suma, “The Effectiveness of Using Continuous Variable Transmission (CVT) in 2WD Buggy Vehicles,” *J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 23, no. 1, pp. 53–60, 2023.
- [13] F. Tuerah, M. Umboh, and I. Rondonuwu, “Automasi Alat Uji Tarik Tipe Terco MT 3017 Berbasis Microcontroller,” *J. Online Poros Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 10–21, 2021.
- [14] A. A. Santoso, R. J. Pribadi, and S. Raharja, “Deteksi Cacat Hasil Pengelasan Pada Baja Karbon Rendah Menggunakan Fungsi Transfer Untuk Non Destructive Test (Ndt),” *Pros. Semin. Nas. UNIMUS*, vol. 5, pp. 105–115, 2022.
- [15] N. P. Agus Surya, I. Budiarsa, I. Antara, and B. Jimbaran Bali Abstrak, “Sifat Mekanis Sambungan Dissimilar sStainless Steel 304-Baja Karbon ST 37 Dengan Variasi Diameter Spot Welding Electrode Taper,” *J. Ilm. Tek. DESAIN Mek.*, vol. 9, no. 1, pp. 858–862, 2020.
- [16] K. S. Imam Ibnu Pamungkas, Nani Mulyaningsih, “Pengaruh Variasi Arus Pengelasan SMAW Terhadap Kekutan Tarik Baja Karbon SS400,” *J. Mer-C*, vol. 2, no. 2, pp. 16–21, 2020.
- [17] Erwin, Husen Asbanu, Yefri Chan, Didik Sugiyanto, and Herry Susanto, “Studi Aplikasi Heat Transfer Menggunakan Sistem Penukar Panas Tipe Shell & Tube di Industri Manufaktur,” *J. Pendidik. Tek. Mesin Undiksha*, vol. 12, no. 1, pp. 29–42, 2024, doi: 10.23887/jptm.v12i1.69071.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Pengaruh Arus Listrik Spot Welding KW14-1031 Terhadap Kekuatan Geser Pada Baja St42

I Wayan Suma Wibawa^{1*}, I Made Anom Adiaksa¹, Made Ardikosa Satrya Wibawa¹, A.A. Gede Pradnyana Diputra¹, I Komang Kantun¹ dan I Nyoman Suparta¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80361, Indonesia

*Email: sumawibawa@pnb.ac.id

Abstrak

Teknologi pengelasan tidak hanya berfungsi untuk produksi, tetapi juga sebagai solusi perbaikan bagi semua perangkat berbahan logam. Pengelasan titik merupakan bentuk pengelasan yang menggunakan resistansi listrik untuk menyatukan berbagai produk dari lembaran logam, melalui metode di mana area permukaan logam yang bersentuhan dijoin dengan panas yang dihasilkan dari resistansi aliran listrik. Metode pengelasan ini dipilih karena memiliki beberapa keunggulan, termasuk kemudahan dalam operasional tanpa memerlukan keterampilan khusus seperti dalam teknik pengelasan lainnya, serta proses yang lebih cepat, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi waktu produksi. Kontrol terhadap jalur arus listrik saat pengelasan sangat krusial, karena dapat mempengaruhi karakteristik hasil sambungan, termasuk kualitas pengelasan, ketahanan geser, tingkat kekerasan, dan daya tahan terhadap beban luar. Fokus dari analisis ini adalah untuk mengeksplorasi dampak arus listrik dalam teknik pengelasan titik terhadap kekuatan geser bahan plat baja ST 42. Melalui analisis deskriptif dan representasi grafis, tujuan adalah mengamati hubungan antara arus listrik dengan kekuatan geser yang dihasilkan dari proses pengelasan. Nilai rata-rata kekuatan geser terendah dicatat pada arus input 20.36 A dengan arus keluaran pengelasan 6011.47 A, serta waktu pengelasan 8 detik dan nilai heat input sebesar 61894.30 J, yang menghasilkan 1.67 MPa. Sementara itu, nilai rata-rata kekuatan geser tertinggi tercatat pada arus input 28.95 A dengan arus keluaran pengelasan 6011.47 A, waktu pengelasan 8 detik, dan nilai heat input 88007.92 J, yang mencapai 6.72 MPa. Pengendalian arus listrik diperlukan karena plat baja ST 42 akan mengalami kerusakan pada arus input 32.45 A dan arus keluaran 6323.58 A, waktu pengelasan 8 detik, dengan heat input senilai 98647.84 J.

Kata kunci: *spot, welding, arus, gaya, geser*

Abstract: *Welding technology serves not only as a manufacturing process but also as a repair solution for all metal-based components. Spot welding is a welding method that utilizes electrical resistance to join various products made of sheet metal, in which the contacting metal surfaces are fused by the heat generated from electrical resistance. This welding method is selected due to several advantages, including ease of operation without requiring specialized skills as demanded by other welding techniques, as well as a faster process that enhances production time efficiency. Control of the electrical current path during welding is critical, as it significantly influences the characteristics of the joint, including weld quality, shear strength, hardness level, and resistance to external loads. This study focuses on analyzing the effect of electrical current in spot welding techniques on the shear strength of ST 42 steel plates. Through descriptive analysis and graphical representation, this research aims to observe the relationship between electrical current and the resulting shear strength produced by the welding process. The lowest average shear strength was recorded at an input current of 20.36 A with a welding output current of 6011.47 A, a welding time of 8 seconds, and a heat input of 61894.30 J, yielding a shear strength of 1.67 MPa. Meanwhile, the highest average shear strength was obtained at an input current of 28.95 A with a welding output current of 6011.47 A, a welding time of 8 seconds, and a heat input of 88007.92 J, resulting in a shear strength of 6.72 MPa. Electrical current control is therefore essential, as ST 42 steel plates experienced damage at an input current of 32.45 A and an output current of 6323.58 A, with a welding time of 8 seconds and a heat input of 98647.84 J.*

Keywords: *spot, welding, current, force, shear*

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Dalam sebuah *industry* pengembangan teknologi pengelasan sangat dibutuhkan untuk meningkatkan kualitas produk agar dapat bersaing di pasar yang

semakin ketat, sehingga dibutuhkan inovasi dalam pengelasan untuk mendapatkan hasil yang presisi, mudah dalam proses dan murah. Pengelasan tidak hanya digunakan untuk proses produksi tetapi juga digunakan untuk proses perawatan/perbaikan bahan-bahan yang

terbuat dari logam seperti baja, stainlesssteel, tembaga, dan aluminium [1]. Pengelasan merupakan salah satu proses pengerjaan logam melalui proses pemanasan dan tekanan [2]. *Resistance spot welding* pengerjaannya lebih efektif dan efisien, rapi, cepat dan hemat bahan [3]. Pengelasan titik (*resistance spot welding*) merupakan salah satu metode pengelasan resistansi yang memanfaatkan panas akibat hambatan aliran arus listrik untuk menyambungkan dua atau lebih pelat logam. Sambungan terjadi pada titik-titik tertentu yang ditekan oleh elektroda, di mana panas dihasilkan ketika arus listrik mengalir melalui permukaan logam yang saling bersentuhan. Panas tersebut menyebabkan peleburan lokal sehingga terbentuk inti las (*weld nugget*) yang berfungsi sebagai pengikat antar material. Proses *Welding* merupakan sebuah proses rekayasa kimia dengan metode panas untuk menyambungkan antara 2 logam yang sama ataupun berbeda [4]. Prinsip dasar pengelasan titik didasarkan pada hukum Joule, yang menyatakan bahwa panas yang dihasilkan sebanding dengan kuadrat arus listrik, hambatan listrik, dan waktu pengelasan. Salah satu metode pengelasan ialah las resistansi listrik, pengelasan ini menumpuk dua plat logam kemudian ditekan menggunakan logam penghantar (atas bawah) dengan dialiri arus, aliran listrik ini menghasilkan panas yang mampu mencairkan logam dan menyatu saat dingin [5].

Las resistansi juga memiliki beberapa metode salah satunya *Spot welding* (las titik), las titik ini biasanya digunakan untuk las plat logam dengan model titik atau titik lebih dari satu [6]. Salah satu *variable* yang menentukan panas untuk meleburkan bahan ialah arus listrik yang dapat diatur nilainya, selain itu ada juga *holding time* (lama pemanasan), tekanan elektroda/pengantar arus, diameter pengantar arus. Gaya tekan elektroda berfungsi untuk memastikan kontak yang baik antara elektroda dan permukaan material yang dilas. Tekanan yang tidak sesuai dapat meningkatkan hambatan kontak yang tidak diinginkan dan mempengaruhi distribusi panas selama proses pengelasan. Elektroda dalam *spot welding* umumnya terbuat dari paduan tembaga karena memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi. Bentuk dan ukuran elektroda mempengaruhi distribusi arus listrik serta ukuran *nugget* las. Keausan elektroda dapat menurunkan kualitas sambungan sehingga diperlukan perawatan dan penggantian secara berkala. Arus listrik merupakan parameter paling dominan dalam *spot welding* karena berperan langsung dalam pembentukan panas dan *nugget* las. Arus yang terlalu rendah akan menghasilkan panas yang tidak cukup sehingga sambungan menjadi lemah, sedangkan arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan cacat las seperti *expulsion* dan kerusakan material. Waktu pengelasan menentukan lamanya arus listrik mengalir melalui material. Waktu yang terlalu singkat dapat mengakibatkan *nugget* tidak terbentuk secara sempurna, sementara waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan pembesaran *nugget* yang berlebihan dan penurunan kualitas sambungan.

Namun dari kelebihan tersebut juga memiliki kelemahan dalam kondisi atau keperluan tertentu seperti terbatas pada penyambungan pelat logam tipis, memerlukan peralatan khusus dengan kapasitas arus

tinggi, kurang fleksibel untuk desain sambungan yang kompleks.

Spot welding dipilih karena proses pengelasannya lebih mudah, Proses pengelasan berlangsung cepat dan efisien, Tidak memerlukan bahan tambah, cocok untuk produksi massal, Kualitas sambungan relatif seragam dan tidak perlu memiliki skill yang sangat tinggi atau terampil untuk mengoperasikannya [7]. Tegangan geser adalah jenis tegangan yang bekerja sejajar dengan bidang penampang suatu material akibat adanya gaya yang berusaha menggeser satu bagian material terhadap bagian lainnya. Tegangan ini umumnya terjadi pada sambungan mekanik, seperti paku keling, baut, dan sambungan las, termasuk sambungan hasil pengelasan titik (*spot welding*). Tegangan geser berperan penting dalam menentukan kemampuan suatu material atau sambungan dalam menahan beban lateral. Kualitas karakter hasil pengelasan seperti kekuatan geser, kekerasan dan kekuatan pengaruh dari luar sangat dipengaruhi oleh pengaturan arus listrik yang tepat [8].

Pemilihan setingan arus listrik harus tepat untuk mendapatkan kekuatan geser pada sambungan las yang terbaik hal ini didapatkan dari pengujian yang sifatnya berulang untuk menghasilkan pengaturan yang tepat. Pada tebal yang sama arus yang kecil menghasilkan panas yang rendah untuk melakukan penetrasi/pelelehan yang baik sehingga penembusannya kurang dalam dan area pelelehan kecil. Sedangkan arus yang terlalu besar menghasilkan panas tinggi, pencairan logam terlalu cepat dan pelelehan yang lebar hal ini dapat menaikkan Tingkat kerapuhan dan tegangan geser yang rendah. Hasil riset sebelumnya dengan arus 0.9 kA dan *holding time* 0.25 detik menghasilkan hasil las dengan kekuatan tarik rendah, dan dengan seting 1.85 kA *holding time* 1 detik menghasilkan hasil pengelasan dengan kekuatan tarik tinggi dengan bahan baja dua fase (*ferrite-martensite*) [9]. Penelitian selanjutnya dengan bahan sambungan *spot welding* baja dengan aluminium didapatkan kekuatan Tarik tertinggi pada setingan arus 75 Ampere [10]. Arus pengelasan sebesar 8000 A dan waktu pengelasan selama 4 siklus menghasilkan kondisi pengelasan optimal pada sambungan las titik baja tahan karat *austenitic*. AISI 316 L [11]. Kekuatan tarik/geser terbesar dan kekerasan tertinggi tercapai pada waktu penekanan 20 detik pada material plat galvanis [12].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, parameter utama yang berperan penting meliputi arus listrik, waktu pengelasan, dan gaya tekan elektroda. Di antara parameter tersebut, arus listrik memiliki pengaruh signifikan terhadap besar kecilnya *heat input*, pembentukan *nugget* las, serta sifat mekanik sambungan yang dihasilkan. Arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan sambungan tidak sempurna, sedangkan arus yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan cacat las, kerusakan material, dan penurunan kualitas sambungan. Oleh karena itu, pengendalian dan pemilihan parameter arus listrik yang tepat sangat diperlukan untuk memperoleh sambungan las yang optimal. Salah satu indikator penting dalam menilai kualitas sambungan pengelasan titik adalah kekuatan geser, yang mencerminkan kemampuan sambungan dalam menahan beban kerja. Penelitian mengenai pengaruh setingan

ampere terhadap kekuatan geser sambungan las titik, khususnya pada pelat baja ST 42, menjadi penting sebagai dasar dalam optimasi parameter pengelasan serta peningkatan kualitas dan keandalan sambungan dalam aplikasi industri. Pengelasan titik banyak digunakan dalam industri otomotif untuk penyambungan bodi kendaraan, industri peralatan rumah tangga, industri konstruksi ringan, serta fabrikasi logam lembaran. Metode ini sangat efektif dalam produksi massal yang memerlukan kecepatan dan kesamaan kualitas sambungan. Salah satu parameter utama dalam menilai kualitas sambungan *spot welding* adalah kekuatan geser. Pengujian kekuatan geser dilakukan untuk mengetahui kemampuan sambungan dalam menahan beban kerja. Selain itu, kualitas sambungan juga dapat dievaluasi melalui pengamatan struktur mikro dan tingkat kekerasan pada daerah las.

Dari beberapa hasil riset menjelaskan variabel waktu penekanan (*pressing welding*), arus pengelasan, dan waktu pengelasan memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat-sifat logam dari hasil pengelasan meliputi sifat mekanik dan kekuatannya. Penelitian dilakukan dengan menggunakan jenis material lainnya yaitu baja ST 42.

1.2. Rumusan Masalah

Dari pembahasan latar belakang yang sudah disampaikan mengenai pengelasan kemudian lebih menghusus ke *spot welding*, dimana ada beberapa factor yang mempengaruhi hasil pengelasan *spot welding* seperti ketrampilan welder/tenaga kerja, jenis mesin, ampere pengelasan, diameter dan bentuk elektroda, tekanan objek dan waktu penahanan saat pengelasan. Dalam penelitian ini akan di bahas mengenai nilai arus listrik/ ampere pada pengelasan *spot welding* yang menghasilkan pengelasan dengan nilai kekuatan geser yang paling bagus pada bahan baja ST 42.

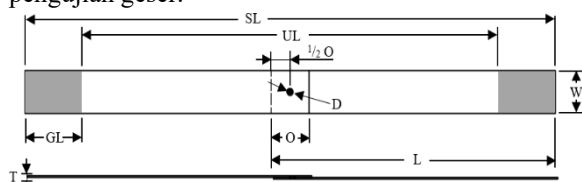
1.3. Tujuan

Penelitian ini dimaksudkan untuk mendapatkan informasi nilai arus listrik/ ampere pada pengelasan *spot welding* yang menghasilkan pengelasan dengan nilai kekuatan geser yang paling bagus pada bahan baja ST 42.

2. Metode dan Bahan

2.1. Benda Uji

Metode yang digunakan adalah eksperimental pengujian dan pengambilan data pada mesin *spot welding* dan shear test. Bahan plat baja ST 42 dibentuk sesuai dengan standar uji geser AWS D8.9M sebagai syarat untuk melakukan pengujian geser.



Gambar 1. Standar AWS D8.9M benda uji geser

Keterangan gambar:

SL:	Panjang keseluruhan specimen	= 420 mm
UL:	Panjang daerah tidak dijepit mesin	= 270 mm
GL:	Panjang daerah dijepit mesin	= 75 mm
T:	Tebal spesimen (<i>thickness</i>)	= 2.2 mm
O:	Tumpang tindih (<i>overlap</i>)	= 30 mm
1/2O:	Tumpang tindih (<i>overlap</i>)	= 15 mm

L:	Panjang	= 225 mm
D:	Diameter pengelasan	= 5 mm
W:	Lebar dijepit mesin	= 30 mm

Analisis ini menggunakan mesin *ultimate testing machine* untuk pengambilan data. Spesimen ini dibuat dari dua buah plat baja yang sama, dengan ukuran masing-masing plat sebagai berikut: panjang 225 mm, lebar 30 mm, panjang daerah pegangan yang dijepit mesin 75 mm, ketebalan 1.1 mm, dan panjang daerah yang tidak dijepit mesin 150 mm.

Jumlah specimen untuk setiap *variable* adalah 10 buah. *Variable* tetap adalah arus dan waktu pengelasan. Arus ditetapkan pada 20.36 A, 24.54 A dan 28.95 A sesuai dengan seting alat *spot welding* yang digunakan. Waktu setiap pengelasan diseting 8 detik untuk setiap *specimen*. *Variable* bebas dari penelitian adalah kekuatan geser hasil pengelasan yang dilakukan pengujian dengan alat uji.

Metode kuantitatif dipergunakan untuk mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam penelitian serta pengolahan menggunakan metode deskriptif. Metode analisis deskriptif merupakan metode analisa dengan mendeskripsikan data yang telah ditampilkan dalam bentuk grafik [13]. Hasil pengujian dibuatkan grafik untuk melihat pengaruh arus terhadap kekuatan geser hasil pengelasan. Analisis deskriptif dipergunakan untuk dapat menggambarkan kekuatan geser yang didapatkan.

2.2. Perhitungan Tegangan Geser

Uji Tarik dan geser merupakan metode pengujian terhadap sifat mekanis bahan logam yang hampir mirip dengan memberikan gaya kepada bahan, namun yang membedakan ialah arah gayanya dimana kalau uji tarik pemberian gayanya ialah kearah *vertical* sedangkan uji geser arah gaya yang di berikan ke material ialah arah memanjang (*longitudinal*) [14]. Untuk mengetahui sifat-sifat mekanis pada sambungan las seperti perubahan penampang, perpanjangan bahan, reduksi bahan dilakukan pengujian geser, pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin uji geser, dalam mesin uji geser beban/bahan dijepit kemudian diberikan gaya yang berlawanan sehingga membuat benda menjadi tergeser/pertambahan panjang. Perubahan ini di catat oleh sensor pada mesin yang akan di terjemahkan ke dalam grafik maupun angka. Rumus tegangan geser sangat penting karena memungkinkan penentuan perilaku material di bawah beban tarik. Rumus tegangan geser (τ) menghubungkan gaya geser (F) dengan luas penampang (A_0), diperoleh (τ) pada masing-masing variasi arus listrik pengelasan [15]:

$$\tau = \frac{F_v}{A_0} \quad (1)$$

dimana

τ = Tegangan geser (MPa)

F = Beban geser (N)

rumus regangan geser:

$$\gamma = \frac{\Delta_s}{S_0} \quad (2)$$

dimana:

γ = Regangan geser (%)

Δ_s = Pertambahan panjang (mm)

s_0 = Panjang awal (mm)

rumus modulus geser:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

dimana:

G = Modulus geser

τ = Tegangan geser

γ = Regangan geser.

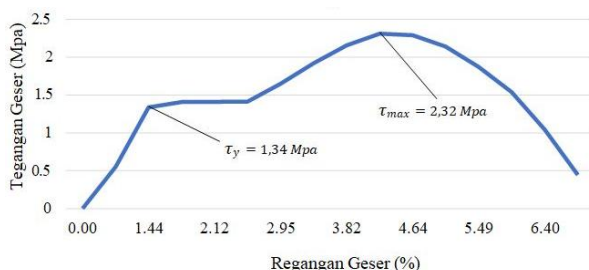
Pada sambungan las, khususnya pada pengelasan titik, tegangan geser terjadi ketika sambungan menerima beban yang bekerja sejajar terhadap bidang sambungan. Kekuatan geser sambungan dipengaruhi oleh ukuran dan kualitas nugget las, distribusi panas selama proses pengelasan, serta sifat mekanik material dasar. Sambungan las yang memiliki nugget las yang kecil atau tidak terbentuk secara sempurna cenderung memiliki ketahanan geser yang rendah.

Pengujian tegangan geser dilakukan untuk mengetahui kemampuan material atau sambungan dalam menahan gaya geser sebelum mengalami kegagalan. Pada sambungan las titik, pengujian ini biasanya dilakukan dengan metode *lap shear test*, di mana spesimen diberi beban tarik hingga sambungan mengalami patah. Nilai tegangan geser dihitung berdasarkan gaya maksimum yang diterima sambungan dibagi dengan luas penampang sambungan.

Dalam aplikasi industri, analisis tegangan geser sangat penting untuk memastikan keamanan dan keandalan struktur. Sambungan yang tidak mampu menahan tegangan geser yang terjadi dapat menyebabkan kegagalan struktur dan menurunkan umur pakai komponen. Oleh karena itu, perhitungan dan pengujian tegangan geser menjadi dasar dalam perancangan sambungan, khususnya pada struktur yang menerima beban dinamis dan berulang.

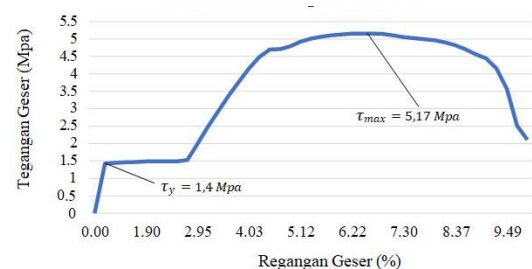
Alat uji universal dapat digunakan untuk menguji geser suatu material. Setelah spesimen dijepit pada mesin uji geser, beban statik ditambahkan secara bertahap hingga spesimen akhirnya putus. *Plotter* terhubung langsung ke besarnya beban dan panjang tambahan, sehingga diperoleh grafik tegangan (N/m² atau MPa) dan regangan (%). Grafik ini memberikan informasi tentang tegangan normal (σ), tegangan geser (τ), tegangan geser modulus bahan (G), ketangguhan, dan keuletan sambungan las yang diuji geser.

3. Hasil Pengujian



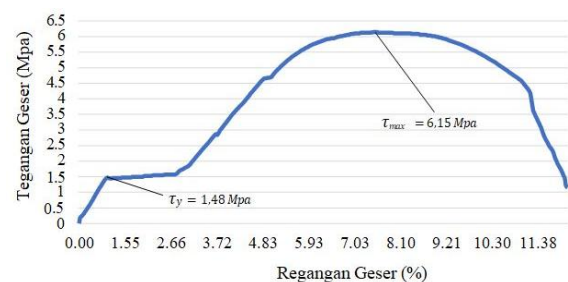
Gambar 2. Grafik tegangan-regangan arus input 20.36 A

Gambar 2 menunjukkan kurva hasil uji geser dengan arus listrik input 20.36 A. Terdapat fase elastis pada awal kurva di mana baja mengalami deformasi, dalam hal ini apabila dilepaskan maka material/baja akan kembali ke bentuk semula, sedangkan garis lurus menunjukkan hubungan yang saling terhubung antara tegangan dan regangan. Setelah mencapai titik batas elastis ($\tau_y = 1.34 \text{ Mpa}$), baja memasuki fase plastis, dimana deformasi permanen mulai terjadi. Kurva mulai melengkung dan menunjukkan kenaikan regangan yang signifikan tanpa peningkatan tegangan yang besar menunjukkan baja mengalami penyerapan energi sebelum akhirnya mencapai titik puncak, yaitu tegangan maksimum atau kekuatan tarik maksimum ($\tau_{max} = 2.32 \text{ Mpa}$). Kurva akan menurun setelah tegangan maksimum menunjukkan bahwa sambungan pada plat baja ST 42 mulai mengalami leheran (*necking*) dan akhirnya patah/lepas.



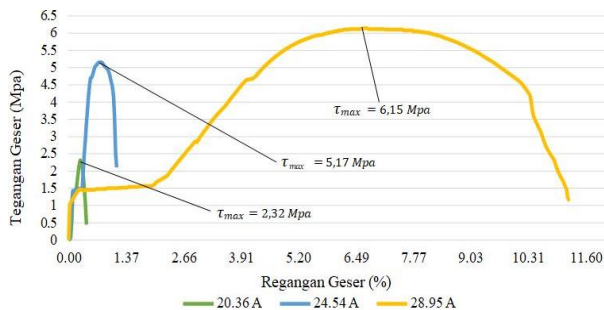
Gambar 3. Grafik tegangan-regangan arus listrik input 24.54 A

Gambar 3 menunjukkan kurva hasil uji geser dengan arus listrik input 20.36 A. Terdapat fase elastis di mana baja mengalami deformasi sementara dalam hal ini apabila dilepaskan maka material/baja akan kembali ke bentuk semula. Hubungan antara tegangan dan regangan ditunjukkan dengan garis lurus, sesuai dengan *Hukum Hooke*. Setelah mencapai titik batas elastis ($\tau_y = 1.4 \text{ Mpa}$), baja memasuki fase plastis, dimana deformasi permanen mulai terjadi. Kurva mulai melengkung dan menunjukkan kenaikan regangan yang signifikan tanpa peningkatan tegangan yang besar. Baja mengalami penyerapan energi sebelum akhirnya mencapai titik puncak, yaitu tegangan maksimum atau kekuatan tarik maksimum ($\tau_{max} = 5.17 \text{ Mpa}$). Kurva akan menurun menunjukkan bahwa sambungan pada plat baja ST 42 mulai mengalami leheran (*necking*) dan akhirnya patah/lepas.



Gambar 4. Grafik tegangan-regangan arus input 28.95 A

Berdasarkan gambar 4 terlihat bahwa kurva hasil uji geser dengan arus listrik *input* 20.36 A pada awal kurva, terdapat fase elastis di mana baja mengalami deformasi sementara yang akan kembali ke bentuk semula setelah gaya dilepaskan. Ini ditandai dengan sebuah garis lurus yang menunjukkan hubungan linier antara tegangan dan regangan, sesuai dengan *Hukum Hooke*. Setelah mencapai titik batas elastis ($\tau_y = 1.48 \text{ Mpa}$), baja memasuki fase plastis, dimana deformasi permanen mulai terjadi. Kurva mulai melengkung dan menunjukkan kenaikan regangan yang signifikan tanpa peningkatan tegangan yang besar. Ini adalah tahap di mana baja mengalami penyerapan energi sebelum akhirnya mencapai titik puncak, yaitu tegangan maksimum atau kekuatan tarik maksimum ($\tau_{max} = 6.15 \text{ Mpa}$). Setelah tegangan maksimum, kurva akan menurun menunjukkan bahwa sambungan pada plat baja ST 42 mulai mengalami leheran (*necking*) dan akhirnya patah/lepas di titik terakhir pada kurva.



Gambar 5. Grafik tegangan-regangan

Kekuatan geser akan semakin meningkat berbanding lurus dengan kenaikan arus listrik dengan *holding time*/waktu penahanan las titik yang sama, hal ini dapat dilihat dari grafik pada gambar 5. Ketika arus las meningkat, input panas yang dihasilkan juga bertambah, yang berakibat pada perubahan struktur dan ukuran butir di area las, sehingga tercipta area dengan tingkat kekerasan yang tinggi. Proses pendinginan juga perlu diperhatikan karena suhu ruangan juga dapat mempengaruhi Tingkat kekerasan, yang membuat luas area las bertambah dan, akibatnya, nilai kekuatan gesernya juga meningkat. Kenaikan arus las telah menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada kekuatan geser. Ini disebabkan oleh variasi arus las yang menghasilkan peningkatan input panas, yang membuat luas area las meningkat meskipun tidak terlalu signifikan, tetapi gaya gesernya menunjukkan kenaikan yang cukup besar. Gaya geser yang meningkat pesat dan luas area las yang hanya sedikit bertambah, diperoleh nilai kekuatan geser yang sangat melonjak pada gambar 5 setiap kali terjadi peningkatan input panas. Nilai rata-rata tertinggi dari kekuatan geser tercatat pada arus *output* las sebesar 6011.47 A, dengan durasi pengelasan 8 detik, menghasilkan input panas sebesar 88007.92 J, yaitu 6.72 MPa. Sementara itu, nilai rata-rata terendah dari kekuatan geser ditemukan pada arus *output* las yang sama, yaitu 6011.47 A, waktu pengelasan 8 detik, dengan input panas 61894.30 J, yaitu 1.67 MPa.

4. Kesimpulan

Analisis grafik menunjukkan bahwa peningkatan arus listrik yang digunakan berkontribusi pada peningkatan nilai gaya geser (N) yang pada gilirannya akan memperkuat kekuatan gesernya. Sejalan dengan pertumbuhan arus listrik, input panas juga menjadi lebih besar, yang memperbesar kemampuan untuk mencairkan logam, sehingga jumlah logam yang meleleh akan meningkat.

Holding time pengelasan 8 detik dengan arus input 20.36 ampere, arus *output* 6011.47 ampere menghasilkan kekuatan geser bahan paling rendah, serta nilai input panas 61894.30 J yaitu 1.67 MPa. Sementara itu, kekuatan geser rata-rata tertinggi tercatat pada arus input 28.95 A dengan arus *output* pengelasan 6011.47 A, waktu pengelasan 8 detik, serta nilai input panas 88007.92 J yaitu 6.72 MPa. Arus listrik dibatasi karena pelat baja ST 42 akan mengalami kebocoran pada arus input 32.45 A dengan arus *output* 6323.58 A, waktu pengelasan 8 detik, dan nilai input panas 98647.84 J.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih yang mendalam penulis ucapkan kepada semua pihak yang mendukung dan membantu baik dalam penelitian, pengambilan data, pengolahan data sampai dalam penyusunan jurnal ini. Terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali yang telah memberikan dukungan fasilitas dalam pengambilan data, pengolahan data maupun kesempatan untuk publikasi ilmiah hasil dari penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] I. Martati and D. Kusrihandayani, "Analisa Pengaruh Variasi Kuat Arus Dan Waktu Terhadap Kekuatan Hasil Las Plat 1 Milimeter Dengan Menggunakan Spotwelding," *Pros. 4th Semin. Nas. Penelit. Pengabd. Kpd. Masy.* 2020, pp. 124–129, 2020.
- [2] T. C. Wahyudi, S. D. Handono, H. A. Sanjaya, and A. B. Sulaiman Azis, "Analisa pengaruh media pendingin dan arus listrik pada proses pengelasan titik (spot welding) stainless steel terhadap nilai kekuatan tarik," *ARMATUR Artik. Tek. Mesin Manufaktur*, vol. 2, no. 2, pp. 94–99, 2021, doi: 10.24127/armatur.v2i2.1448.
- [3] M. A. Fitrah, M. Ikhsan, and H. H. Utami, "Analisis Leveled Surface Terhadap Diameter Nugget Las Pada Plat Stainless Steel 304 Proses Resistance Spot Welding (Rsw)," *J. Tematis (Teknologi, Manufaktur dan Ind.)*, vol. 4, no. 2, pp. 2985–4946, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.politeknikbosowa.ac.id/index.php/TMT/article/view/414>
- [4] S. I. Samudra, H. Widya Prasetya, D. I. Pratiwi, T. Mekanika Perkeretaapian, P. Perkeretaapian, and I. Madiun, "Pengaruh Variasi Arus Resistance Spot Welding Terhadap Kuat Tarik Material Stainless Steel 304 Kereta K1," vol. 9, no. 2, pp. 26–32, 2023.
- [5] Lukmanul Hakim, "Pengaruh Pengelasan Smaw Terhadap Kekuatan Impak Dan Hardness Dengan Variasi Arus 80,90, Dan 100 Amper Pada Baja Stainles 308," vol. 4, no. 2, pp. 1–7, 2020.

- [6] S. I Made Suniartha, Setyawan, "Pengaruh Arus , Waktu Dan Ketebalan Pelat Pada Proses Spot Welding Baja Karbon Rendah Terhadap Kekuatan Geser Dan Struktur Mikro Effect of current , time and plate thickness in spot welding process of low carbon steel on shear strength and microstructure," *J. Keilmuan dan Terap. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 1–8, 2021.
- [7] B. Aziz, W. Winarso, and D. N. Kusuma Hardani, "Rancang Bangun Alat Spot Welding Menggunakan Transformator Oven Microwave Dengan Kendali Dimmer," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 69–78, 2020, doi: 10.30595/jrre.v2i2.8274.
- [8] A. Santosa, F. C. Suci, R. Hanifi, J. T. Mesin, U. S. Karawang, and I. Pendahuluan, "Pengaruh Variasi Arus Listrik Pada Pengelasan Flash Butt Welding Terhadap Kekuatan Tarik," *Infomatek*, vol. 22, no. 1, pp. 35–40, 2020, doi: 10.23969/infomatek.v22i1.2750.
- [9] S. Sulardjaka, D. F. Fitriyana, and A. Budiman, "Kajian Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Shield Metal Arc Welding dan Friction Stir Welding Baja Karbon St 37," *Rotasi*, vol. 19, no. 4, p. 193, 2020, doi: 10.14710/rotasi.19.4.193-200.
- [10] B. K. S. Handaru and Y. Yunus, "Pengaruh Proses Quenching Berulang Hasil Pengelasan Smaw Pada Pipa Kilang Astm a 106 Grade B Terhadap Kekuatan Tarik ...," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 91–96, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/48177/40231>
- [11] . M. and R. Hidayatullah, "Nilai Ampere Pengelasan Smaw Dengan Menggunakan Elektroda 6013," *Sainstech J. Penelit. Dan Pengkaj. Sains Dan Teknol.*, vol. 32, no. 2, pp. 36–48, 2022, doi: 10.37277/stch.v32i2.1295.
- [12] A. E. Purkuncoro and A. Taufik, "Analisa Pengaruh Variasi Pressing Welding Time Terhadap Karakteristik Sifat Mekanik Dan Sifat Fisis Pada Proses Resistance Spot Welding (Rsw) Material Plat Galvanis," *J. Flywheel*, vol. 11, no. 1, pp. 27–32, 2020, doi: 10.36040/flywheel.v11i1.2510.
- [13] I. M. A. Adiaksa and A. Wibolo, "Experimental analysis of fluids discharge in cooling tower condenser distillation model," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012093.
- [14] N. P. Agus Surya, I. Budiarsa, I. Antara, and B. Jimbaran Bali Abstrak, "Sifat Mekanis Sambungan Dissimilar sStainless Steel 304-Baja Karbon ST 37 Dengan Variasi Diameter Spot Welding Electrode Taper," *J. Ilm. Tek. DESAIN Mek.*, vol. 9, no. 1, pp. 858–862, 2020.
- [15] A. Wibowo, *Fisika Teknik*, Pertama. Semarang: Universitas Sains dan teknologi Komputer, 2022.
- [16] Hudiono and P. I. Santoso, "Pengaruh Besarnya Arus Las SMAW Terhadap Kekerasan Dan Kekuatan Tarik Pada Sambungan Plat A36 Pada Pembuatan Pelat Baja Badan Kapal," *Pros. Semin. Teknol. Kebumian Dan Kelaut. (SEMITAN II)*, vol. 2, no. 1, pp. 5–9, 2020.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Studi Eksperimental Perpindahan Panas pada Pengering Sepatu Berbasis Rak Datar

I Made Agus Putrawan^{1*}, I Made Anom Adiaksa¹, I Wayan Suma Wibawa¹ dan I Ketut Adi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80364, Indonesia

*Email: agusputrawan@pnb.ac.id

Abstrak

Pengeringan sepatu merupakan proses penting dalam menjaga kebersihan dan memperpanjang usia pakai alas kaki, terutama di lingkungan dengan tingkat kelembaban tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas pada sistem pengering sepatu berbasis rak datar secara eksperimental. Sistem pengering dirancang menggunakan elemen pemanas listrik dengan konfigurasi rak horizontal yang memungkinkan distribusi panas merata. Variabel yang diamati meliputi temperatur udara masuk, temperatur permukaan sepatu, waktu pengeringan, serta perubahan kadar air. Pengukuran dilakukan pada beberapa posisi rak untuk mengetahui distribusi temperatur secara vertikal dan horizontal. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa mekanisme konveksi paksa dominan dalam proses pengeringan, dengan distribusi temperatur yang cukup homogen pada rak bagian tengah, namun terdapat penurunan temperatur pada rak teratas dan terbawah. Perpindahan panas radiasi yang dihasilkan mesin pengering sepatu yaitu sebesar 5,41 J/s dan perpindahan panas konveksi sebesar 238,8 J/s. Kadar air yang hilang meningkat seiring dengan peningkatan waktu pengeringan yang menunjukkan waktu 90 menit merupakan waktu terbaik dari variasi yang dilakukan. Studi ini memberikan dasar untuk pengembangan desain pengering sepatu yang lebih efisien dan hemat energi, serta membuka peluang integrasi sumber panas alternatif seperti energi surya.

Kata kunci: perpindahan panas, pengering sepatu, rak datar, konveksi, efisiensi termal

Abstract: Shoe drying is a crucial process for maintaining hygiene and extending the lifespan of footwear, especially in high-humidity environments. This study aims to experimentally investigate the heat transfer characteristics of a flat-rack-based shoe dryer. The system is designed with electric heating elements and a horizontal rack configuration to promote uniform heat distribution. Key observed parameters include inlet air temperature, shoe surface temperature, drying time, and moisture content reduction. Measurements were conducted at multiple rack levels to evaluate vertical and horizontal temperature distribution. The results indicate that forced convection is the dominant heat transfer mechanism, with relatively uniform temperature distribution observed in the middle racks, while the top and bottom racks experienced temperature deviations. The heat transfer by radiation generated by the shoe dryer is 5.41 J/s, and the convective heat transfer is 238.8 J/s. The moisture content loss increases with drying time, indicating that 90 minutes is the optimal drying duration among the tested variations. This study provides a foundation for the development of more energy-efficient shoe drying systems and highlights the potential for integrating alternative heat sources such as solar energy.

Keywords: heat transfer, shoe dryer, flat rack, convection, thermal efficiency

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Sepatu merupakan perlengkapan penting dalam kehidupan sehari-hari. Dalam kondisi cuaca lembap atau penggunaan berat, sepatu seringkali menjadi basah dan memerlukan waktu pengeringan yang lama jika hanya dibiarkan pada temperatur ruangan. Pengeringan alami dapat menyebabkan pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur serta menurunkan umur pakai sepatu. Oleh karena itu, penggunaan alat pengering sepatu menjadi solusi praktis untuk mempercepat proses pengeringan dan menjaga kebersihan serta kenyamanan sepatu. Perkembangan alat

pengering banyak diaplikasikan, dimulai dari produk pertanian maupun perikanan dengan menggunakan briket batubara [1].

Pengering tipe rak datar merupakan salah satu sistem yang paling mudah dibuat dan digunakan. Dalam sistem ini, sepatu diletakkan secara horizontal di atas rak, dan udara hangat dialirkan secara konvektif untuk menghilangkan kelembaban. Elemen pemanas (*heater*) berfungsi untuk meningkatkan temperatur udara sehingga mempercepat proses evaporasi air dari permukaan sepatu. Perbedaan kadar air sering ditemui saat dilakukan proses

pengeringan. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti: ketebalan lapisan bahan, kelembapan relatif (*relative humidity*/RH) udara pengering, serta kadar air awal bahan. Upaya untuk meminimalkan kondisi tersebut dapat dilakukan melalui pengurangan ketebalan lapisan bahan, peningkatan kecepatan aliran udara pengering, serta penerapan pengadukan selama proses pengeringan.

Pengering rak datar bekerja dengan cara mengalirkan udara panas dari pemanas ke ruang pengering. Udara hangat kemudian mengenai permukaan sepatu secara langsung maupun melalui sirkulasi. Desain ini dikenal memiliki keunggulan berupa kemudahan perawatan, biaya rendah, dan fleksibilitas ukuran. Sistem pengering rak datar dapat dioptimalkan dengan pengaturan ventilasi dan penggunaan kipas untuk mendistribusikan udara panas secara merata [2]. Sementara itu penelitian pengering sepatu menggunakan *heater* listrik mampu mengeringkan sepatu dalam waktu kurang dari 65 menit pada temperatur 30–70°C [3]. Modifikasi tipe pengering berputar menggunakan motor listrik 0,25 HP pada poros lempengan dengan kecepatan putaran menggunakan *gearbox reducer* 1:50 dan temperatur panas 80°C dengan kapasitas 3 pasang sepatu dalam 1 proses pengeringan [4]. Beberapa jenis pemanas yang umum digunakan meliputi pemanas listrik tipe elemen logam (*nichrome*), pemanas PTC (*positive temperature coefficient*), dan pemanas berbasis lampu pijar. *Heater* listrik banyak dipilih karena mudah dikontrol dan memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi [5]. Penting untuk memperhatikan temperatur operasi karena temperatur yang terlalu tinggi dapat merusak material sepatu, terutama bahan sintesis atau lem. Penggunaan kombinasi heater PTC, thermostat, dan kipas mampu menghasilkan sistem pengeringan yang efektif, aman, dan hemat energi [6].

Dalam desain pengering sepatu modern, pengontrol temperatur berbasis termostat atau mikrokontroler (misalnya Arduino) sering digunakan untuk menjaga temperatur dalam batas yang diinginkan. Beberapa sistem juga dilengkapi dengan sensor kelembapan untuk memantau tingkat kekeringan sepatu secara *real-time* [7]. Efisiensi energi merupakan parameter penting dalam desain alat pengering. Kinerja dapat dinilai berdasarkan konsumsi daya, waktu pengeringan, dan tingkat kelembapan akhir. Sistem pengeringan sepatu yang diintegrasikan dengan IoT (*Internet of Thing*) telah dikembangkan untuk memberikan kemudahan dalam memantau kondisi sepatu dari jarak jauh [8]. Pengembangan sistem IoT menggunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi keberadaan sepatu serta sensor DHT22 sebagai pembaca nilai temperatur dan kelembapan [9].

Fenomena mesin pengering sepatu mengubah model pengering konvensional yang sebelumnya menggunakan sinar matahari sebagai sumber media panas. Penggunaan mesin pengering sepatu dapat memberikan beberapa keuntungan yaitu: waktu pengeringan yang relatif lebih singkat, pengkondisian terhadap bakteri dan jamur, maupun terintegrasi menggunakan sistem kontrol yang canggih. Telah banyak dilakukan penelitian mengenai rancang bangun sistem pengering sepatu yang terintegrasi menggunakan sistem kontrol temperatur yang terintegrasi. Namun pada penelitian ini akan dibahas mengenai hasil studi eksperimental pengaruh waktu pengeringan terhadap perpindahan panas yang terjadi serta jumlah kadar air yang

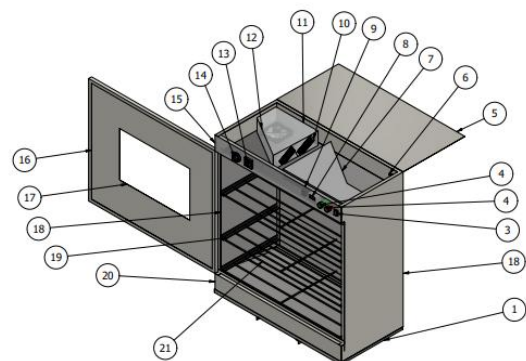
mampu dihilangkan pada sebuah mesin pengering sepatu tipe rak datar kapasitas 9 pasang sepatu.

Penelitian ini menganalisa perpindahan panas yang dihasilkan *heater* ke ruangan pengering, menganalisa perpindahan panas dari ruangan pengering ke sepatu. Standar tingkat kekeringan sepatu diukur sebesar dengan berat sepatu sebesar 5 – 10% dari berat awal sepatu kering [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari alat pengering sepatu tipe datar yang mencakup fenomena perpindahan panas yang terjadi, waktu pengeringan dan analisa berat air yang hilang akibat proses pengeringan yang dilakukan dengan jenis dan kualitas bahan sepatu yang berbeda – beda.

2. Metode dan Bahan

2.1. Desain

Rak sepatu dibuat menggunakan bahan plat *stainless steel* dengan dimensi p x l x t adalah 85cm x 40cm x 70cm ketebalan 1 mm. Volume rak secara keseluruhan adalah 0,238m³ yang dilengkapi 3 dudukan rak datar untuk pengeringan sepatu dan dipasang dengan jarak 20cm. Proses pemanasan ruangan menggunakan *heater* tipe PTC pada bagian atas rak sepatu. Dimensi lubang udara panas adalah 8,2cm x 8,2cm. *Heater* dapat dikontrol secara otomatis dengan mengatur *timer analog*. Sebuah kipas (*fan*) bekerja pada tegangan 12V arus 0,09A pada putaran 4.000 rpm digunakan untuk menghembuskan udara panas dari *heater* sebesar 3,10 CFM (*cubic feet per min*) ke seluruh bagian sisi rak sepatu seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



- | | |
|---|--|
| 1. Dudukan mesin pengering | 12. Fan |
| 2. Cover luar | 13. Timer analog |
| 3. Saklar on dan off | 14. Thermostat analog |
| 4. Lampu merah dan hijau | 15. Cover depan bagian atas |
| 5. Tutup atas mesin | 16. Pintu |
| 6. Steker | 17. Kaca |
| 7. Tutup ventilasi keluaran udara panas | 18. Box dudukan sepatu |
| 8. Thermostat digital | 19. Dudukan rak |
| 9. Relay | 20. Cover depan bagian bawah dan penutup bawah |
| 10. Heater | 21. Rak |
| 11. Rumah heater dan fan | |

Gambar 1. Desain alat pengering

2.2. Metode pengujian

Penelitian ini melibatkan pengujian secara eksperimental yaitu dengan mengukur berat sepatu kering menggunakan timbangan digital. Pengukuran ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan hasil pengeringan sepatu yang dihasilkan dari alat pengering. Tiga jenis sepatu yang digunakan yaitu sepatu *boots*, *sneaker* dan sepatu kulit. Proses perpindahan panas diuji dengan mencatat

temperatur yang terjadi pada sisi permukaan pemanas (*heater*) pada sisi ruangan, dan pada sisi permukaan sepatu.

a. Persiapan Alat dan Bahan:

- Mesin pengering rak datar dilengkapi dengan kotak pemanas menggunakan sebuah *heater* listrik jenis PTC 220V dengan daya 500Watt.
- Alat ukur temperatur digital (*thermocouple* atau termometer digital).
- *Hygrometer* untuk mengukur kelembaban relatif udara.
- Timbangan digital untuk mengukur berat sepatu sebelum dan sesudah pengeringan.
- *Stopwatch* atau *timer*.
- Sepatu uji dengan kadar air yang telah dikondisikan (direndam selama 30 menit, kemudian ditiriskan selama 10 menit).

b. Prosedur Pengujian

Pengujian diawali dengan mempersiapkan mesin pengering sepatu. Sebelum pengujian dilakukan, penting untuk melakukan pengecekan temperatur dan keamanan mesin kemudian dilanjutkan dengan pendataan berat sepatu kering dan berat sepatu basah untuk mengetahui kadar air yang terdapat pada sepatu. Sepatu yang akan diuji sebelumnya direndam terlebih dahulu, dan sedikit ditiriskan sampai tidak ada tetesan air yang keluar, kemudian dilakukan pengukuran berat awal sepatu, dilanjutkan dengan pengaturan *timer* (waktu pengeringan) pada 30, 60, dan 90 menit seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Setelah waktu tercapai, catat berat sepatu yang dihasilkan dari masing-masing variasi waktu. Temperatur pada titik pengukutan dicatat menggunakan *digital display*. Temperatur ruangan pengering sepatu disetting konstan yaitu sebesar 70°C untuk menghindari kerusakan bahan.



Gambar 2. Penimbangan berat sepatu

c. Perhitungan

- Kadar air yang hilang dihitung dari selisih berat awal dan berat akhir.
- Laju perpindahan panas konveksi [11]
Proses perpindahan panas konveksi yaitu panas yang diterima oleh kadar air yang diterima oleh sepatu yang menyebabkan terjadi penguapan., To adalah panas yang dihasilkan *heater* dan Ti adalah panas yang diterima sepatu dari *heater*

$$Q = h.A.\Delta T \quad (1)$$

Keterangan:

Q = Kalor konveksi (W atau J/s).

ΔT = Selisih kalor ($T_o - T_i$).

h = Koefisien perpindahan panas konveksi udara ($W/m^2\text{°C}$).

A = Luas penampang (m^2).

- Laju perpindahan panas radiasi dihitung berdasarkan pendekatan hukum Stefan-Boltzmann [12].

$$W = e.\sigma.A.T^4 \quad (2)$$

Keterangan:

W = Kalor yang dipancarkan setiap detik (J/s).

e = Emisivitas benda ($0 < e < 1$).

σ = Konstanta stefan ($5,67 \times 10^{-8} \text{ watt/m}^2\text{k}^4$).

A = Luas permukaan (m^2).

T = Temperatur permukaan benda (°K).

Untuk mengetahui distribusi temperatur dalam ruang pengering, dilakukan pengambilan data pada beberapa titik pengukuran. Titik-titik ini ditentukan secara merata di dalam ruang pengering, baik secara horizontal maupun vertikal, untuk mewakili sebaran temperatur di seluruh volume ruangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Termometer digital inframerah digunakan untuk mengukur temperatur pada masing-masing titik dinding dan pemantauan langsung pada permukaan sepatu.

Titik pengambilan temperatur ditempatkan sebagai berikut:

1. Titik bawah dasar rak (posisi 5 cm dari dasar ruang pengering).
2. Titik tengah pada rak pertama tempat sepatu diletakkan.
3. Titik atas ruang pengering (5 cm dari langit-langit ruang).
4. Titik sisi kiri dan kanan ruang pengering pada ketinggian rak.



Gambar 3. Penentuan titik pengukuran

Proses validasi hasil pengukuran dengan menggunakan *thermogun* untuk mengetahui besarnya temperatur pada permukaan plat seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Pengukuran temperatur menggunakan *thermogun*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian yaitu meliputi pengaruh variasi waktu pengeringan, berat awal sepatu, berat akhir sepatu dan jumlah kadar air yang hilang.

Tabel 1. Data pengujian sepatu *boots*

Waktu pengeringan (menit)	Temperatur ruangan Pengering (°C)	Berat sepatu pada kondisi kering (gram)	Berat sepatu basah (gram)	Berat sepatu setelah dikeringkan (gram)	Kadar air yang hilang (gram)
30	70	1.438	1.861	1.841	20
60	70	1.438	1.861	1.820	41
90	70	1.438	1.861	1.782	79
Rata - rata		1.438	1.861	1.841,3	46,7

Tabel 2. Data pengujian sepatu *sneakers*

Waktu Pengeringan (menit)	Temperatur Ruangan Pengering (°C)	Berat sepatu pada kondisi kering (gram)	Berat Sepatu Basah (gram)	Berat Sepatu setelah Dikeringkan (gram)	Kadar air yang hilang (gram)
30	70	420	623	585	38
60	70	420	623	558	65
90	70	420	623	513	110
Rata - rata		420	623	552	71

Tabel 3. Data pengujian sepatu *pantofel*

Waktu Pengeringan (menit)	Temperatur Ruangan Pengering (°C)	Berat sepatu pada kondisi kering (gram)	Berat Sepatu Basah (gram)	Berat Sepatu setelah Dikeringkan (gram)	Kadar air yang hilang (gram)
30	70	464	544	531	13
60	70	464	544	526	18
90	70	464	544	516	28
Rata – rata		464	544	524,3	19,7

Berdasarkan tabel 1-3 diatas terdapat hasil pengujian tentang proses pengeringan mesin pengering sepatu *universal*. Pada variasi waktu 90 menit dengan menggunakan sepatu *boots* berat sepatu setelah dikeringkan sebesar 1.782 gram pada temperatur 70°C, sepatu *sneakers* dengan berat sepatu setelah dikeringkan sebesar 513 gram pada temperatur 70°C, dan sepatu *pantofel* dengan berat sepatu setelah dikeringkan sebesar 516 gram pada temperatur 70°C.

3.2. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan panas tanpa memerlukan media perantara. Proses perpindahan panas radiasi yang terjadi pada mesin pengering sepatu yaitu dari heater yang menghasilkan panas kemudian mengalir masuk kedalam kotak pemanas. Blower digunakan untuk mengalirkan udara panas menuju kotak sepatu dengan sebesar T. Perhitungan laju perpindahan panas radiasi didasarkan pada luas area yang memancarkan panas, yaitu penampang kipas 8,2cm x 8,2cm menuju ke kotak sepatu. Besarnya perpindahan panas radiasi dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan perpindahan panas radiasi

Emisivitas suatu benda e	Konstanta stefan σ (w/m ² K ⁴)	Luas benda yang memancarkan radiasi A (m ²)	Temperatur mutlak 70 + 273 T (°K)	Kalor yang dipancarkan setiap detik $W = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$ (J/s)
1	5,67x10 ⁻⁸	0,0069	343	5,41

3.3. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi yang dianalisis adalah panas yang diterima oleh permukaan sepatu. Besarnya panas di permukaan sepatu ditunjukkan dengan T_i dan panas yang dihasilkan oleh heater adalah T_o. Besarnya selisih kedua temperatur ini digunakan sebagai metode menentukan

besarnya perpindahan panas konveksi. Sedangkan luas area perpindahan panas berdasarkan pada luas penampang penyangga sepatu. Besarnya perpindahan panas radiasi dapat dilihat pada tabel 5.

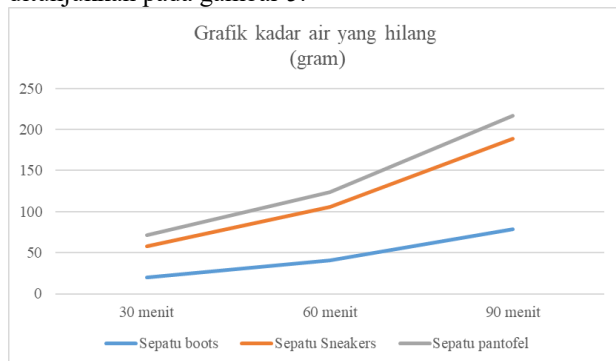
Tabel 5. Hasil perhitungan perpindahan panas konveksi

Rak	Koefisien perpindahan panas konveksi h (W/m ² °C)	Luas penampang A (m ²)	Selisih kalor ΔT $T_o - T_i$ (°C)	Kalor konveksi $Q = h.A.\Delta T$ (J/s)	Keterangan
1	10	0,344	27,5	94,6	Fluks Total didapat dari hasil penjumlahan kalor konveksi (J/s)
2	10	0,344	27,5	94,6	
3	10	0,344	27,5	94,6	
Fluks Total			-	238,8	-

3.4. Kadar air

Kadar air yang terdapat pada sepatu sebelum dikeringkan (berat sepatu pada kondisi kering) untuk sepatu *boots* sebesar 1.438 gram. Kadar air yang hilang pada sepatu *boots* setelah dikeringkan dengan variasi waktu 30 menit sebesar 20 gram, dengan variasi waktu 60 menit sebesar 41 gram, dan pada variasi waktu 90 menit sebesar 79 gram. Untuk sepatu *sneakers* sebesar 420 gram.

Kandungan air pada sepatu jenis *boots* sebelum proses pengeringan tercatat sebesar 1.438 gram. Setelah proses pengeringan selama 30 menit, berat air yang berkurang pada sepatu *boots* mencapai 20 gram, meningkat menjadi 41 gram pada 60 menit, dan mencapai 79 gram pada 90 menit seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik kadar air yang hilang pada proses pengeringan sepatu

Sedangkan pada jenis sepatu *sneakers* tercatat memiliki berat awal sebesar 420 gram. Setelah proses pengeringan selama 30 menit, kadar airnya berkurang menjadi 38 gram, selama 60 menit menjadi 65 gram, dan variasi waktu 90 menit menjadi 110 gram. Berat awal untuk jenis sepatu *pantofel* diketahui sebesar 464 gram. Setelah dikeringkan selama 30 menit, kadar yang hilang sebesar 13 gram, dan mengalami peningkatan menjadi 18 gram pada waktu 60 menit dan 28 gram selama 90 menit. Berdasarkan hasil pengujian, terlihat adanya tren peningkatan pengurangan kadar air seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan. Hal ini menunjukkan bahwa durasi pemanasan sangat mempengaruhi laju pengeringan, di mana semakin lama waktu pemanasan, maka semakin banyak uap air yang keluar dari sepatu. Efektivitas pengeringan juga didukung oleh kestabilan temperatur dalam ruang pengering yang dijaga dalam rentang 65-70°C. Temuan ini konsisten dengan prinsip dasar perpindahan panas dan berat pada proses

pengeringan, di mana temperatur dan waktu menjadi faktor dominan terhadap efisiensi evaporasi kelembaban.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis perpindahan panas yang dihasilkan dari mesin pengering sepatu dapat disimpulkan, yaitu:

1. Besarnya laju perpindahan panas radiasi adalah sebesar 5,41 watt sedangkan laju perpindahan konveksi sebesar 238,8 watt.
2. Terjadinya tren peningkatan pengurangan kadar air yang dihasilkan dari ketiga jenis sepatu dengan meningkatnya waktu pengeringan yaitu sebesar 20 gram selama 30 menit untuk sepatu jenis boots, 41 gram untuk waktu pengeringan 60 menit dan 79 gram untuk durasi pengeringan 90 menit. Sedangkan untuk jenis sepatu *sneakers*, kadar air yang hilang adalah sebesar 38 gram selama 30 menit, 65 gram selama 60 menit dan 110 gram selama 90 menit. Jenis sepatu pantofel memiliki berat kadar air yang hilang sebesar 13 gram selama 30 menit, 18 gram dalam durasi 60 menit dan 28 gram selama 90 menit proses pengeringan.
3. Sepatu jenis boot memiliki karakteristik lebih sulit untuk dikeringkan dibandingkan dengan jenis sepatu kulit maupun sneaker.
4. Variasi waktu 90 menit memberikan hasil pengeringan yang paling baik dibandingkan dengan 30 dan 60 menit, namun dengan konsekuensi energi yang dibutuhkan juga semakin meningkat sehingga pemanfaatan sumber energi alternatif dapat dilakukan untuk mengurangi beban energi pemanasan.

Ucapan Terima Kasih

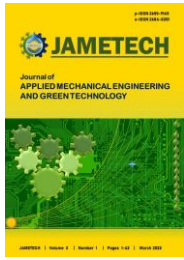
Penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan dan dukungan dari teman sejawat, teknisi dan mahasiswa yang telah membantu dalam proses pengambilan data. Ucapan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali yang telah memberikan dukungan fasilitas dalam pengambilan data, pengolahan data maupun kesempatan untuk publikasi ilmiah hasil dari penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] A. Firdaus, "Perancangan dan analisa alat pengering ikan dengan memanfaatkan energi briket batubara," J. Mech. Eng., vol. 05, no. 4, 2016.
- [2] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul, and M. Y. Sulaiman, "Review of solar dryers for agricultural and marine products,"

Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 1, pp. 1–30, 2010.

- [3] Miftahudin, Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan pada Mesin Pengering Menggunakan Logika Fuzzy, no. 8.5.2017. 2022.
- [4] F.- Maghfurah, W.- Windarta, R.- Effendi, D.- Rizaldy, and A.- Ramadhan, “Pengaplikasian Sproket Untuk Putaran Lempengan Pada Mesin Pengering Sepatu Sintetis Dengan Memakai 2 (dua) Pemanas,” *Suara Tek. J. Ilm.*, vol. 13, no. 1, p. 25, 2022.
- [5] M. Aramesh and B. Shabani, *Thermal Energy Storage*, vol. 16, no. 2. 2023.
- [6] M. H. Fitri et al., “Rancang bangun mesin pengering sepatu ramah lingkungan dengan sistem heater,” vol. 4, no. 1, 2026.
- [7] B. Baskaran, M. Mukramin, and B. Sulaeman, “Rancang Bangun Sistem Pengering Sepatu Otomatis Menggunakan Sensor Kelembaban Suhu Berbasis Arduino,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3S1, 2024.
- [8] H. Hidayatullah, I. Imaduddin, and A. Muhtadi, “Prototype Alat Pengering Sepatu Menggunakan Sensor DHT 22 Berbasis Internet Of Things (IoT),” *J. Teknol. Elektro*, vol. 13, no. 3, p. 166, 2022.
- [9] M. R. Ramdan, T. Akbar, and H. M. Putra, “Sistem Monitoring Pengering Sepatu Otomatis Berbasis IoT,” *J. Print. J. Pengemb. Rekayasa Inform. dan Komput.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–52, 2023.
- [10] O. Sembada, S. Widodo, K. Suharno, and F. Hilmy, “ANALISIS ALAT PENDINGER SEPATU TERHADAP LAJU PENDINGERAN,” *J. Mech. Eng.*, vol. 4, 2020.
- [11] S. I Gede Bawa and A. Ida Bagus, *Perpindahan Panas Konveksi*. Mataram University Press, 2020.
- [12] J. V. Tuapetel, *Perpindahan Panas Radiasi*. Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia, 2019.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Menekan Nilai SAIDI SAIFI pada Penyulang *Monkey Forest* dengan Pemasangan D-Star (Doble Isolator Tarik) dan Perisai Bintang

I Gst. Ketut Abasana¹, I Made Anom Adiaksa^{2*}, I Gde Nyoman Sangka¹ dan Ida Bagus Gde Widiantera²

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80364, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80364, Indonesia

*Email: madeanomadiaksa@pnb.ac.id

Abstrak

PT PLN (persero) ULP Gianyar mengelola 29 penyulang, salah satunya penyulang *Monkey Forest* menyalurkan tenaga listrik pada daerah *Monkey Forest* mendistribusikan tenaga listrik seluas 716810.232 m² dan panjang bentangan kabel total sepanjang 3,65 km yang disuplai oleh gardu induk Payangan mendistribusikan tenaga listrik ke 41 gardu distribusi pada daerah *monkey forest* dengan jumlah pelanggan sebanyak 3062 pelanggan. Gangguan pada penyulang *Monkey Forest* didominasi oleh binatang karena berada pada lokasi wisata yang merupakan habitat kera. Alat inovasi D-STAR mengamankan dari gangguan akibat binatang khususnya monyet pada konstruksi tiang peregang di titik pertemuan/sambungan kabel udara berisolasi (SKUTM) dengan konduktor SUTM. perisai binatang atau yang biasanya disebut dengan *Cover Bushing* adalah untuk mengamankan komponen jaringan distribusi dari gangguan yang disebabkan oleh hewan seperti tokek yang dengan mudah menjangkau komponen listrik. Pengaruh dari pemasangan alat inovasi D-STAR (double isolator tarik) dan perisai binatang pada nilai SAIDI dan SAIFI di penyulang *Monkey Forest* sangat baik, pada tahun 2023 nilai SAIDI sebesar 1,38 jam/pelanggan/tahun dan nilai SAIFI sebesar 1,31 kali/pelanggan/tahun dimana nilai tersebut melewati target dari PLN ULP Gianyar tahun 2024 setelah pemasangan D-STAR dan perisai binatang nilai SAIDI sebesar 0,01 jam/pelanggan/tahun dan nilai SAIFI sebesar 0,03 kali/pelanggan/tahun, nilai tersebut sudah memenuhi target PLN ULP Gianyar serta SPLN NO 68-2 : 1986.

Kata kunci: penyulang, SAIDI, SAIFI, perisai, binatang

Abstract: PT PLN (Persero) ULP Gianyar manages 29 feeders, one of which is the *Monkey Forest* feeder, distributing electricity to the *Monkey Forest* area, distributing electricity over an area of 7,168,10,232 m² and a total cable length of 3.65 km supplied by the Payangan substation distributing electricity to 41 distribution substations in the *Monkey Forest* area with a total of 3,062 customers. Disturbances to the *Monkey Forest* feeder are dominated by animals because they are located in a tourist location which is a monkey habitat. The D-STAR innovation tool protects against interference caused by animals especially monkeys, in the construction of the stretcher pole at the meeting point/connection of the insulated aerial cable (SKUTM) with the SUTM conductor. Animal shields or what are usually called *Cover Bushings* are to protect distribution network components from interference caused by animals such as geckos that can easily reach electrical components. The effect of installing the D-STAR innovation tool (double tensile isolator) and animal shield on the SAIDI and SAIFI values in the *Monkey Forest* feeder is very good, in 2023 the SAIDI value is 1.38 hours/customer/year and the SAIFI value is 1.31 times/customer/year where the value exceeds the target of PLN ULP Gianyar in 2024 after the installation of D-STAR and animal shield the SAIDI value is 0.01 hours/customer/year and the SAIFI value is 0.03 times/customer/year, the value has met the target of PLN ULP Gianyar and SPLN NO 68-2: 1986.

Keywords: feeder, SAIDI, SAIFI, shield, animal

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

PT.PLN (Persero) ULP Gianyar mengelola, salah satunya diberi nama penyulang *Monkey Forest* dikarenakan menyalurkan tenaga listrik pada daerah *Monkey Forest*, penyulang ini mendistribusikan tenaga listrik seluas 716810.232 m² dan panjang bentangan kabel total di penyulang *Monkey Forest* sepanjang 3,65 km yang disuplai

oleh gardu induk Payangan, yang mendistribusikan tenaga listrik ke 41 gardu distribusi pada daerah *Monkey Forest*, dengan jumlah pelanggan sebanyak 3062 pelanggan [1]. Pada daerah yang disuplai oleh penyulang *Monkey Forest* banyak terdapat pohon yang rindang serta binatang seperti monyet, tupai, burung, dan ular yang masih bebas pada alam liar, selain itu pada daerah tersebut banyak terdapat pemukiman warga yang bangunannya tinggi. karena itu membuat pada

daerah tersebut sering terjadi gangguan dan mempengaruhi nilai SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) [2].

Masalah utama dikarenakan binatang monyet naik pada jaringan SKUTM, dan binatang yang menyentuh komponen jaringan sehingga mengakibatkan suplai tenaga listrik ke konsumen menjadi terhambat dimana pada periode bulan Januari tahun 2021 sampai Desember tahun 2023 sebelum pemasangan alat inovasi D-STAR dan perisai binatang terdapat total 18 kali gangguan, penyebab gangguan diakibatkan oleh peralatan distribusi serta gangguan disebabkan dari luar peralatan distribusi. *Double isolator* Tarik atau sering disebut konstruksi *D-STAR* adalah rangkaian dua isolator tarik terbuat dari bahan polimer atau porselin yang dipasang secara sejajar atau berlawanan pada satu tiang listrik untuk menahan beban mekanis kabel penghantar yang sangat besar. Fungsi utama selain untuk menahan beban mekanis kabel yang tinggi. *D-STAR* juga berfungsi sebagai pemisah antara bagian yang bertegangan (kabel fasa) dengan tiang penyangga yang terhubung ke tanah demi keamanan sistem.

D-STAR dirancang khusus untuk melindungi jaringan dari gangguan binatang (seperti tupai, ular, atau burung). Penggunaan dua isolator yang dipasang sejajar akan memperpanjang jalur isolasi, tubuh binatang tidak akan menjembatani antara kabel bertegangan dengan tiang (ground) yang dapat memicu *short circuit*. Dari 18 gangguan terdapat 4 kali disebabkan oleh komponen rusak dan 1 kali dikarenakan bencana alam, 13 gangguan karena binatang, untuk gangguan disebabkan oleh binatang dimana tahun 2021 terdapat 3 kali, tahun 2022 terdapat 7 gangguan dan tahun 2023 terdapat 3 gangguan, titik gangguan tersebut terletak pada tiang peregang pertemuan antara jaringan SUTM dan jaringan SKUTM, serta pada *recloser* dan *fuse cut out* (FCO). Gangguan yang disebabkan oleh peralatan distribusi dan bencana alam pada tahun 2021 terdapat 0 gangguan, tahun 2022 terdapat 4 gangguan, tahun 2023 terdapat 1 gangguan. Gangguan tersebut diakibatkan karena *fuse link* pada FCO putus, bencana alam tanah longsor. Gangguan pada 3 tahun tersebut sebelum pemasangan perisai binatang dan D-star (*double isolator* tarik). Gangguan binatang mendominasi dengan total 72%, yang mengakibatkan nilai SAIDI pada tahun 2021 untuk penyulang *Monkey Forest* menjadi 1,57 jam/pelanggan/tahun, serta nilai SAIFI menjadi 1,00 kali/pelanggan/tahun. Tahun 2022 membuat nilai SAIDI menjadi 4,37 jam/pelanggan/tahun serta nilai SAIFI menjadi 2,76 kali/pelanggan/tahun dan pada tahun 2023 membuat nilai SAIDI menjadi 1,74 jam/pelanggan/tahun serta nilai SAIFI menjadi 1,62 kali/pelanggan/tahun, dengan nilai SAIDI dan SAIFI pada tahun 2021 sampai 2023 nilai tersebut sudah melewati target dari target PLN ULP Gianyar.

1.2. Rumusan Masalah

1. Berapa nilai SAIDI dan SAIFI akibat gangguan binatang.
2. Bagaimana pengaruh pemasangan perisai binatang dan D-STAR (*double isolator* tarik) terhadap nilai SAIDI SAIFI.

1.3. Tujuan

Pemasangan perisai binatang yang bertujuan untuk mengamankan komponen distribusi yang tidak berisi isolasi, serta memasang alat inovasi yang diberi nama D-Star (*double isolator* tarik) dari pemasangan alat tersebut pada tahun 2024 pada penyulang *Monkey Forest*.

2. Metode dan Bahan

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dalam pengumpulan data-data yang diperlukan serta pengolahan menggunakan metode deskriptif [3]. Metode deskriptif merupakan hasil pengolahan data yang ditunjukkan dalam bentuk grafik dan dianalisis untuk diambil kesimpulannya [4]. Data yang diolah ditunjukkan dalam bentuk grafik dan dianalisis untuk diambil kesimpulannya. Pendekatan dengan metode deskriptif bertujuan untuk memberikan gambaran yang sistematis, faktual, dan akurat mengenai fakta-fakta serta sifat-sifat populasi.

Data dalam bentuk grafik, tren dan pola persebaran data dapat divisualisasikan serta diidentifikasi dengan lebih mudah. Interpretasi yang objektif terhadap fenomena yang sedang diteliti dapat dilakukan dengan analisis terhadap representasi visual. Penyederhanakan data mentah yang kompleks menjadi informasi yang lebih komunikatif dan mudah dipahami dapat dilakukan dengan metode deskriptif. Argumentasi atau temuan utama menjadi landasan kuat untuk mendukung penelitian analisis ini. Kemampuannya untuk memotret kondisi subjek penelitian tanpa melakukan intervensi atau manipulasi variabel ditunjukkan dengan metode deskriptif.

Kesimpulan penelitian memiliki relevansi yang tinggi dengan kondisi nyata di lapangan didukung oleh penerapan metode deskriptif yang tepat. Data yang dibutuhkan adalah jumlah gangguan yang terjadi serta penyebabnya. Data diperoleh dengan observasi langsung pada PLN ULP Gianyar serta pengamatan langsung. Data yang telah di kumpulkan dilakukan pengolahan dengan beberapa tahapan yaitu:

2.1. Perhitungan Persentase Gangguan

Berdasarkan standar ANSI/IEEE Std. 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai kondisi fisik yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubungan singkat antar fase atau hubungan singkat fase ke tanah. Gangguan hampir selalu berupa hubungan langsung atau melalui impedansi. Anomali parameter elektrik seperti arus lebih (*overcurrent*) atau tegangan kurang (*undervoltage*) yang melampaui ambang batas operasional normal merupakan pemicu kondisi secara umum.

Kegagalan tersebut sering kali bermanifestasi dalam bentuk hubungan singkat yang mengganggu kontinuitas penyaluran energi ke beban dalam sistem tenaga listrik. Kegagalan fisik pada isolasi penghantar dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada infrastruktur jaringan yang mahal maka perlu dilakukan analisis mengenai fenomena tersebut. Kegagalan beruntun atau *cascading failure* dapat diakibatkan oleh gangguan yang tidak terdeteksi oleh sistem proteksi berpotensi pemadaman meluas. Penggunaan perangkat proteksi yang presisi dapat menjadi solusi utama dalam memitigasi dampak fisik yang dijelaskan dalam standar IEEE. Proteksi yang baik pada area

yang terdampak gangguan dapat diisolasi secara cepat sehingga kerusakan komponen lainnya dapat diminimalisir. Karakteristik dan definisi gangguan fisik perlu dimitigasi secara mendalam yang menjadi fondasi utama dalam merancang sistem kelistrikan yang andal dan aman.

Istilah gangguan identik dengan hubungan, sesuai standart ANSI/IEEE Std. 100-1992 [5]. Meminimalisir faktor eksternal yang dapat memicu pemutusan aliran daya secara tiba-tiba dapat mempengaruhi efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Menghitung persentase penyebab gangguan sebelum dan sesudah pemasangan perisai binatang dan D-STAR sebagai solusi mengatasi gangguan yang diakibatkan oleh binatang merupakan salah satu langkah krusial yang harus dilakukan sebagai evaluasi. Hubung singkat fasa ke tanah maupun fasa ke fasa pada konstruksi tiang yang terbuka dapat disebabkan oleh hewan seperti tupai, burung, atau ular. Gangguan akibat fauna dapat mendominasi frekuensi pemadaman pada area yang berdekatan dengan vegetasi lebat didapatkan dari hasil pengamatan pada lokasi jaringan penyalang.

Perisai binatang (*animal guard*) berfungsi sebagai penghalang fisik. Teknologi *Distribution Surround-Type Animal Repeller* (D-STAR) merupakan salah satu solusi perlindungan tambahan melalui mekanisme mitigasi yang lebih kompleks. Efektivitas perangkat tersebut dalam menekan angka *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) dapat diukur secara akurat dengan membandingkan persentase sebelum dan sesudah implementasi. Data yang diperoleh dapat dianalisis oleh operator sistem untuk mengidentifikasi apakah terdapat penurunan signifikan pada titik-titik rawan gangguan yang telah dipetakan sebelumnya. Implementasi teknologi perisai binatang dan D-STAR dapat menjadi strategi preventif yang esensial dalam menjaga keandalan jaringan distribusi. Menghitung persentase penyebab gangguan sebelum dan sesudah pemasangan perisai binatang dan D-STAR sebagai solusi mengatasi gangguan yang diakibatkan oleh binatang pada penyalang *Monkey Forest* dengan rumus sebagai berikut [6]:

$$\frac{\text{jumlah gangguan}}{\text{total gangguan}} \times 100\% \quad (1)$$

2.2. Perhitungan SAIDI dan SAIFI

Indeks keandalan merupakan suatu metode pengevaluasian parameter suatu peralatan distribusi tenaga listrik terhadap mutu pelayanan kepada pelanggan. Indeks ini antara lain adalah SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) [7]. Indeks keandalan merupakan suatu metode pengevaluasian parameter suatu peralatan distribusi tenaga listrik terhadap mutu pelayanan kepada pelanggan dalam manajemen sistem tenaga listrik.

Gambaran kuantitatif mengenai seberapa sering dan seberapa lama terjadi pemadaman pada sisi konsumen didapatkan dari penerapan indeks ini. *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) dan *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) merupakan parameter utama yang sering diukur sebagai indikator performa jaringan. Penyedia jasa kelistrikan dapat mengidentifikasi titik lemah pada konfigurasi sistem distribusi yang memerlukan perbaikan segera dengan memantau parameter tersebut. Kinerja peralatan seperti penyalang yang

dievaluasi secara sistemis dapat membantu dalam memprioritaskan jadwal pemeliharaan preventif secara lebih efektif. Basis data penting proyeksi kebutuhan investasi infrastruktur dimasa depan dihasilkan dari perhitungan indeks keandalan. Kepuasan pelanggan serta stabilitas operasional industri berkorelasi dengan tingkat keandalan yang tinggi yang bergantung sepenuhnya pada pasokan energi. Pengukuran indeks dengan standarisasi harus diterapkan secara konsisten guna menjamin kontinuitas energi yang memenuhi regulasi yang berlaku.

SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) jaringan penyalang merupakan indeks pengukuran durasi rata-rata gangguan yang dialami oleh sistem penyalang listrik dalam satu tahun, diukur dalam menit per pelanggan. SAIDI dapat memberikan informasi untuk membantu menilai sejauh mana suatu sistem penyalang listrik dapat memenuhi kebutuhan pelanggan dengan menyediakan daya listrik yang handal dan berkelanjutan [8]. SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) merupakan indeks keandalan yang mengukur rata-rata frekuensi gangguan pada jaringan distribusi listrik. SAIFI menunjukkan seberapa sering pelanggan mengalami gangguan pemadaman listrik karena kegagalan pada penyalang tersebut. Perhitungan indeks ini dengan membagi jumlah total gangguan yang dialami oleh pelanggan dengan jumlah total pelanggan yang dilayani [9].

Menghitung nilai SAIDI dan SAIFI dari jumlah gangguan pada penyalang *Monkey Forest* sebelum dipasang perisai binatang dan D-STAR, serta menghitung nilai SAIDI dan SAIFI ketika sudah dipasang perisai binatang dan D-STAR. Rumus yang digunakan penulis untuk menghitung nilai SAIDI dan untuk nilai SAIFI sebagai berikut yaitu:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^m (ci)}{N} \quad (2)$$

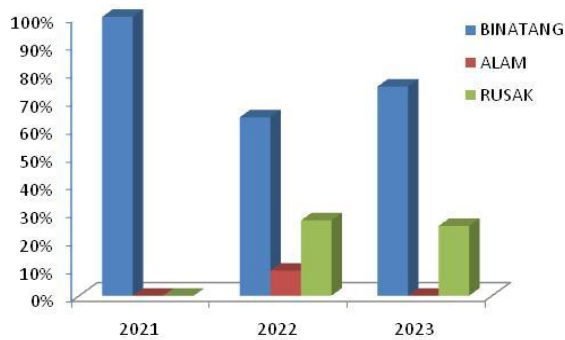
$$d = \frac{\sum_{i=1}^m (ci \times ti)}{N} \quad (3)$$

Hasil perhitungan yang didapat dari persentase adanya gangguan akan mempengaruhi nilai SAIDI dan SAIFI. Nilai SAIDI dan SAIFI akan dibandingkan dengan target yang telah ditetapkan oleh PLN Distribusi Gianyar serta SPLN NO 68-2 : 1986. Data perbandingan akan diterjemahkan dalam bentuk grafik. Analisis deskriptif dipergunakan untuk dapat menggambarkan pengaruh dari pemasangan alat inovasi D-STAR dan perisai bintang.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Gangguan

Dari data dan perhitungan dapat dilihat faktor-faktor yang menyebabkan padamnya penyalang *Monkey Forest* pada tahun 2021, 2022, 2023 seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Penyebab gangguan penyulang Monkey Forest

Berdasarkan gambar 1 penyebab gangguan penyulang *Monkey Forest* tahun 2021. Karakteristik kegagalan pada jaringan distribusi di kawasan tertentu dipetakan dengan menganalisa mendalam terhadap data historis operasional. Penyebab padam dengan total 3 gangguan yang diakibatkan oleh binatang sebanyak 3 kali dengan persentase sebesar 100%, dan untuk penyebab padam karena alam dan komponen rusak sebanyak 0 kali dengan persentase sebesar 0%. Data menunjukkan penyebab padamnya aliran listrik penyulang *Monkey Forest* pada tahun 2021 didominasi oleh gangguan binatang yaitu sebesar 100% pada periode ini secara langsung mengeksklusi faktor kegagalan material atau fenomena atmosferik.

Faktor lingkungan hayati menjadi dominasi tunggal yang mengindikasikan ancaman utama bagi kontinuitas penyaluran tenaga listrik di wilayah tersebut. Letak geografis jaringan yang melintasi habitat alami primata atau vegetasi yang rapat mempengaruhi tingginya interaksi satwa dengan penyulang. Fokus pemeliharaan pada penyulang seharusnya dititikberatkan pada mitigasi gangguan fauna dengan asumsi tidak terdapat kegagalan komponen teknis. Strategi perlindungan konvensional belum cukup efektif dalam membendung gangguan fisik dari makhluk hidup di area *Monkey Forest* maka diperlukan instalasi perlengkapan proteksi khusus seperti *insulation cover* atau penghalang fisik untuk memutus rantai penyebab gangguan tunggal tersebut.

Pergeseran pola dan peningkatan frekuensi kegagalan pada jaringan terjadi saat dilaksanakan evaluasi pada periode berikutnya terhadap kinerja sistem distribusi. Tahun 2022 untuk penyebab padam dengan total 11 gangguan yang diakibatkan oleh binatang sebanyak 7 kali dengan persentase sebesar 64%, untuk penyebab padam karena alam sebanyak 1 kali dengan persentase sebesar 9%, dan untuk penyebab padam karena komponen rusak sebanyak 3 kali dengan persentase sebesar 27%. Intensitas gangguan secara keseluruhan mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan tahun sebelumnya ditunjukkan dengan munculnya factor kegagalan baru dari aspek alam dan degradasi material. Dari data menunjukkan bahwa penyebab padamnya aliran listrik penyulang *Monkey Forest* pada tahun 2022 didominasi oleh gangguan binatang sebesar 64%. menunjukkan bahwa faktor fauna tetap menjadi risiko residu utama. Indikasi gangguan akibat kerusakan komponen sebesar 27% menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk melakukan evaluasi terhadap usia pakai peralatan atau kualitas pemeliharaan rutin.

Pengaruh cuaca ekstrem belum menjadi ancaman dominan dari kontribusi faktor alam bagi infrastruktur di penyulang ini. Diperlukan analisis multivariat terhadap penyebab gangguan untuk merancang strategi mitigasi yang lebih komprehensif dan tepat sasaran. Identifikasi proporsi setiap penyebab bagi operator sistem dapat mengalokasikan sumber daya perbaikan secara lebih proporsional antara penguatan fisik dan pembaruan komponen. Peningkatan jumlah gangguan dari 3 menjadi 11 kejadian menuntut langkah korektif yang lebih agresif guna mengembalikan indeks keandalan ke level optimal. Tren penurunan frekuensi kegagalan total meskipun pola penyebabnya tetap memiliki karakteristik yang serupa dengan periode sebelumnya ditunjukkan dari hasil analisis performa jaringan.

Penyebab padam pada tahun 2023 yang diakibatkan oleh binatang sebanyak 3 kali dengan persentase sebesar 75% dan penyebab padam karena komponen rusak sebanyak 1 kali dengan persentase sebesar 25%. Indikasi awal mengenai keberhasilan langkah pemeliharaan ditunjukkan dari penurunan jumlah gangguan dari tahun sebelumnya, walaupun faktor interaksi fauna masih menjadi kontributor mayoritas. Optimalisasi penghalang fisik pada titik-titik kritis penyulang karena dominansi gangguan binatang yang mencapai tiga perempat dari total kejadian. Kegagalan akibat kerusakan komponen sebesar 25% menunjukkan bahwa penurunan kualitas material tetap menjadi variabel yang harus diantisipasi melalui pengujian parameter elektrik secara berkala. Penurunan intensitas gangguan dari hasil analisis terhadap profil risiko pada penyulang tersebut belum sepenuhnya bergeser dari ancaman eksternal biologis. Penerapan standar proteksi secara konsisten sangat menentukan keberhasilan dalam mempertahankan tren penurunan gangguan. Evaluasi menyeluruh terhadap data tahun 2023 ini menjadi landasan penting untuk menjaga target indeks keandalan yang lebih stabil bagi manajemen untuk memvalidasi efektivitas solusi yang telah diterapkan di lapangan.

3.2. Pemasangan Alat Inovasi D-STAR

Pemasangan alat inovasi D-STAR dengan alasan sering terjadi gangguan oleh binatang monyet dan binatang lainnya. Daerah ini banyak terdapat binatang monyet dan sering terjadi binatang naik ke jaringan SUTM yang mengakibatkan arus hubung singkat, D-STAR ini untuk mengamankan dari gangguan akibat binatang khususnya binatang monyet pada konstruksi tiang peregang di titik pertemuan/sambungan kabel udara berisolasi (SKUTM) dengan konduktor SUTM di daerah Jl. *Monkey Forest* Ubud dan Jl Bisma Ubud. Modifikasi konstruksi SUTM ini diterapkan/diimplementasikan di tiang peregang dengan tingkat kerawanan gangguan binatang yang cukup tinggi.

Inovasi ini merupakan modifikasi murni terhadap Material Distribusi Utama (MDU) yaitu isolator tarik polimer sesuai SPLN D3.027-1:2016 tanpa adanya material tambahan yang baru. Sebelum pemasangan D-STAR jarak rambat yang tersisa saat monyet berjalan di isolator adalah 169,7 mm, maka pemasangan 1 set isolator tarik akan menyebabkan *short circuit* antara fasa terhadap ground, sedangkan setelah pemasangan D-STAR jarak rambat yang tersisa saat monyet berjalan diatas isolator adalah 349,4 mm, maka pemasangan D-STAR tidak akan menyebabkan *short circuit* antara fasa terhadap ground. D-STAR baru

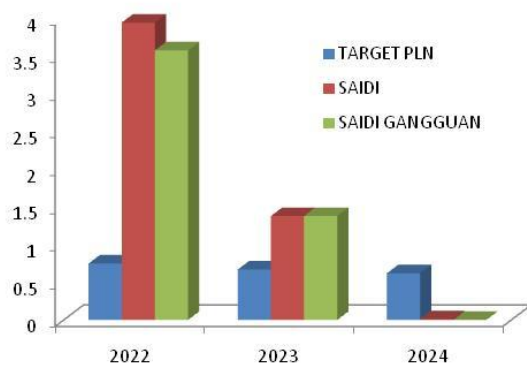
dipasang pada tahun 2024 dan sudah terpasang pada 2 titik yaitu pada Jl. *Monkey Forest* Ubud dan Jl Bisma Ubud. Pemasangan alat D-STAR ini sangat mempengaruhi untuk meningkatkan sistem keandalan dari penyulang *Monkey Forest*.

3.3. Pemasangan Perisai Binatang

Pemasangan perisai binatang atau yang biasanya disebut dengan *Cover Bushing* adalah untuk mengamankan komponen jaringan distribusi dari gangguan yang disebabkan oleh hewan seperti tokek yang dengan mudah menjangkau komponen listrik sebelum pemasangan perisai binatang. Binatang tersebut dengan mudah menyentuh komponen jaringan distribusi dan mengakibatkan *short circuit* dikarenakan komponen tersebut dalam keadaan tanpa pengaman. maka dari itu PT PLN (PERSERO) ULP Gianyar memasang perisai binatang disetiap komponen jaringan distribusi, perisai binatang sudah dipasang dari tahun 2022 namun pada tahun 2024 baru terealisasi untuk seluruh gardu pada penyulang *Mongkey Forest*.

3.4. Hasil Analisis

Perbandingan nilai SAIDI setelah pemasangan alat inovasi D-STAR dan perisai binatang menggunakan hasil perhitungan dimana nilai SAIDI tahun 2022 sebesar 3,95 jam/pelanggan/semester dan yang di karenakan oleh gangguan binatang sebesar 3,58 jam/pelanggan/tahun, nilai SAIDI 1,38 jam/pelanggan/tahun pada tahun 2023 diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 1,38 jam/pelanggan/tahun serta nilai SAIDI sebesar 0,01 jam/pelanggan/tahun pada tahun 2024 diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 0 jam/pelanggan/tahun.



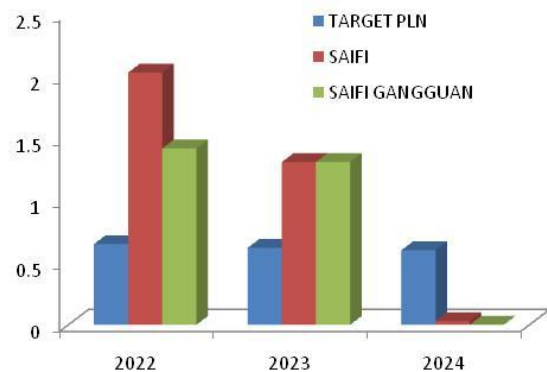
Gambar 2. Perbandingan nilai SAIDI

Pengaruh nilai SAIDI terhadap kehandalan suatu jaringan penyulang sangat signifikan seperti terlihat pada gambar 2. Semakin baik kualitas pelayanan dan kontinuitas suplai listrik ditunjukkan dengan semakin kecilnya nilai SAIDI. Nilai SAIDI yang kecil menunjukkan bahwa gangguan pemadaman listrik terjadi lebih singkat dan frekuensi gangguan lebih rendah. SAIDI mengukur durasi rata-rata gangguan pemadaman listrik pada sistem [10]. Gambar 2 terlihat perbandingan nilai SAIDI pada tahun 2022 sampai 2024. Nilai SAIDI sebesar 3,95 jam/pelanggan/tahun pada tahun 2022 diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 3,58 jam/pelanggan/tahun dengan persentase 91% tersebut telah melewati batas target dari PLN ULP Gianyar dan tahun 2023 nilai SAIDI sebesar 1,38 jam/pelanggan/tahun yang diakibatkan gangguan

binatang sebesar 1,38 jam/pelanggan/tahun dengan persentase yang dikarenakan oleh gangguan binatang 100% dimana nilai SAIDI melewati batas target ULP Gianyar.

Tahun 2024 setelah pemasangan alat inovasi D-STAR dan perisai binatang untuk nilai SAIDI sebesar 0,01 jam/pelanggan/tahun akibat gangguan sebesar 0 jam/pelanggan/tahun dengan persentase yang di akibatkan oleh gangguan binatang sebesar 0% dari nilai SAIDI tersebut sudah memenuhi target dari PT PLN ULP Gianyar. Keandalan jaringan distribusi menunjukkan fluktuasi signifikan pada frekuensi pemadaman selama tiga periode terakhir ditunjukkan dari analisis terhadap data yang diperoleh. Nilai SAIFI tahun 2022 sebesar 2,03 kali/pelanggan/tahun dan diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 1,42 kali/pelanggan/tahun, tahun 2023 nilai SAIFI 1,31 kali/pelanggan/tahun dan yang diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 1,31 kali/pelanggan/tahun yang mengindikasikan bahwa fauna merupakan faktor dominan penyebab instabilitas.

Interaksi satwa menjadi factor yang dominan yang menyebabkan terjadinya gangguan dalam system penyulang Tahun 2024 semester 1 nilai SAIDI sebesar 0,03 kali/pelanggan/tahun dan yang diakibatkan oleh gangguan binatang sebesar 0 kali/pelanggan/tahun. Pemasangan perisai binatang atau teknologi D-STAR memberikan indikasi kuat mengenai efektivitas langkah-langkah mitigasi yang telah diimplementasikan dengan enurunan drastis nilai SAIFI hingga mencapai angka nol untuk kategori gangguan binatang. Peningkatan kualitas pemeliharaan preventif di lapangan mencerminkan keberhasilan menekan *interruption frequency* hingga titik terendah pada semester pertama 2024. Identifikasi akar masalah yang tepat pada tahun-tahun sebelumnya telah berhasil meningkatkan indeks keandalan sistem secara berkelanjutan.



Gambar 3. Perbandingan nilai SAIFI

Pengaruh nilai SAIFI terhadap keandalan jaringan penyulang sangat signifikan seperti terlihat pada gambar 3. Semakin sering pelanggan mengalami gangguan listrik berdampak negatif pada keandalan jaringan ditunjukan oleh nilai SAIFI yang semakin tinggi [11]. Gangguan listrik yang sering dapat menyebabkan berbagai masalah seperti kerusakan peralatan, gangguan operasional bisnis, dan ketidaknyamanan bagi pelanggan. Menurunkan nilai SAIFI dengan meningkatkan kualitas peralatan, melakukan pemeliharaan rutin, dan memperkuat sistem proteksi dapat meningkatkan keandalan dari system jaringan penyulang [12]. Strategi komprehensif yang berfokus pada minimalisir durasi dan frekuensi pemadaman diperlukan untuk menjaga

kontinuitas penyaluran energi listrik. Peningkatkan kualitas peralatan, melakukan pemeliharaan rutin dan memperkuat sistem proteksi dapat meningkatkan keandalan dari sistem jaringan penyalur ditunjukkan dengan penurunan nilai SAIFI.

Memperpanjang usia pakai serta meminimalisir kegagalan mekanis prematur dapat dilakukan dengan peningkatan kualitas material pada komponen kritis seperti isolator dan transformator. Pemeliharaan rutin yang terjadwal dilaksanakan untuk dapat mendeteksi secara dini terhadap gejala kerusakan yang berpotensi memicu pemutusan aliran daya secara tidak terencana. Usaha yang dilakukan seperti penguatan sistem proteksi melalui koordinasi relai yang presisi memastikan setiap gangguan dapat dilokalisasi dengan cepat tanpa berdampak pada area yang lebih luas. Integrasi ketiga aspek tersebut berkorelasi terhadap frekuensi gangguan per pelanggan untuk ditekan hingga mencapai standar performa yang ditetapkan oleh regulasi. Jaminan mutu layanan yang stabil bagi konsumen ditunjang oleh keandalan sistem yang optimal dapat berakibat terhadap pengurangan kerugian finansial bagi penyedia energi. Beban puncak yang terus meningkat harus didukung oleh prasyarat mutlak seperti modernisasi infrastruktur dan manajemen aset yang sistematis. Ekosistem kelistrikan yang lebih tangguh dan efisien dapat tercipta dengan pengoptimalan parameter operasional pada jaringan penyalur.

Perbandingan nilai SAIFI pada tahun 2022 sampai 2024, dimana pada tahun 2022 nilai SAIFI sebesar 2,03 kali/pelanggan/tahun dan akibat gangguan binatang sebesar 1,42 kali/pelanggan/tahun dengan persentase 70% tersebut melewati batas target dari PLN ULP Gianyar. Tahun 2023 nilai SAIFI sebesar 1,31 kali/pelanggan/tahun dan akibat gangguan binatang sebesar 1,31 kali/pelanggan/tahun dengan persentase 100% dimana nilai SAIFI melewati batas target PLN ULP Gianyar. Tahun 2024 setelah pemasangan alat inovasi D-Star dan perisai binatang untuk nilai SAIFI sebesar 0,03 kali/pelanggan/tahun dan akibat gangguan binatang sebesar 0 kali/pelanggan/tahun untuk persentase sebesar 0% dari nilai SAIFI tersebut sudah memenuhi target dari PT PLN (Persero) ULP Gianyar.

4. Kesimpulan

Hasil pemasangan alat inovasi D-STAR dan perisai binatang pada penyalur *Monkey Forest* dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penyalur Monkey Forest pada tahun 2024 dengan nilai SAIDI sebesar 0,01 jam/pelanggan/tahun dan SAIFI sebesar 0,03 kali/pelanggan/tahun. Nilai SAIDI dan SAIFI sudah memenuhi target SAIDI dan SAIFI karena nilainya berada dibawah target yang ditetapkan oleh PLN ULP Gianyar serta sudah memenuhi standar SPLN yang berada dibawah angka yang telah ditetapkan.
2. Pengaruh dari pemasangan alat inovasi D-STAR (*double isolator* tarik) dan perisai binatang pada nilai SAIDI dan SAIFI di penyalur *Monkey Forest* sangat baik, pada tahun 2023 nilai SAIDI sebesar 1,38 jam/pelanggan/tahun dan nilai SAIFI sebesar 1,31 kali/pelanggan/tahun menjadi nilai SAIDI sebesar 0,01 jam/pelanggan/tahun dan nilai SAIFI sebesar 0,03 kali/pelanggan/tahun pada tahun 2024 telah melewati target dari PLN ULP Gianyar serta SPLN NO 68-2 : 1986.

3. Pemasangan D-STAR sangat direkomendasikan untuk diaplikasikan pada penyalur lain terutama jaringan yang berada atau berdekatan dengan habitat Binatang untuk dapat mempertahankan keandalan sistem.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan dan dukungan dari teman sejawat, teknisi dan mahasiswa yang membantu dalam proses pengambilan data. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali yang telah memberikan dukungan fasilitas dalam pengambilan data, pengolahan data maupun kesempatan untuk publikasi ilmiah hasil dari penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] I. M. G. W. S. Prayasa, I. W. Sudiartha, and I. G. W. A. Kurniawan, "Analisis Keandalan Jaringan Distribusi Ring Sistem Penyalur Ubud dan Penyalur Nyuh Kuning dengan Beroperasinya LBS Café Jerry di PT PLN (Persero) ULP Gianyar," *GANAPATI-Jurnal Ilm. Rekayasa Tek.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2024.
- [2] R. Maulana, Suardi, and S. R. Halid, "Analisa Sistem Keandalan Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Section Technique," *J. Kitektro*, vol. Vol. 6, no. No. 3, p. 2021, 2021.
- [3] S. P. D. K. A. S. H. M. A. Ciq. M. J. M. P. Ph.D. Ummul Aiman, M. P. Z. F. Suryadin Hasda, M. P. I. N. T. S. K. M.Kes. Masita, and M. P. M. K. N. A. M.Pd. Meilida Eka Sari, *Metodologi Penelitian Kuantitatif*, Juli 2022. Aceh: Yayasan Penerbit Muhammad Zaini, 2022.
- [4] I. P. Darmawa, I. M. A. Adiaksa, I. Bagus, P. Indra, and I. W. Suma, "The Effectiveness of Using Continuous Variable Transmission (CVT) in 2WD Buggy Vehicles," *J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 23, no. 1, pp. 53–60, 2023.
- [5] I. H. M. H. Pratama, "Analisa Nilai Saidi Saifi Sebagai Indeks Keandalan Penyediaan Tenaga Listrik Pada Penyalur Cahaya Pt. Pln (Persero) Area Ciputat," *Energi & Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 70–77, 2020, doi: 10.33322/energi.v10i1.330.
- [6] S. Syukri, M. Muliadi, and A. Akbar, "Analisa Perhitungan Susut Teknis Di Pt. Pln (Persero) Rayon Singkil," *Elektrika*, vol. 16, no. 1, p. 20, 2024, doi: 10.26623/elektrika.v16i1.8854.
- [7] A. Zaki, I. T. Yuniahastuti, and I. Sunaryantiningsih, "Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Metode SAIDI dan SAIFI di PT. PLN (Persero) ULP Maospati," *ELECTRA Electr. Eng. Artic.*, vol. 2, no. 2, p. 23, 2022, doi: 10.25273/electra.v2i2.12253.
- [8] M. Alwi et al., "Dampak Indeks Saidi Dan Saifi Terhadap Keandalan Sistem Distribusi Pada Penyalur Da.05 Kota Medan," *Konf. Nas. Soc. dan Eng. Politek. Negeri Medan*, pp. 717–725, 2023.
- [9] R. Harahap, H. Farizi, S. Tarmizi Kasim, K. Kunci, and N. Ekonomi, "Analisis Indeks Keandalan Pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyalur KA.1, KU.1 Dan TW.1 Di PT. PLN (Persero) UP3 Lubuk Pakam," *Semnastek-Uisu*, pp. 140–150, 2022.
- [10] S. Nurhadi, M. Fahmi Hakim, and R. Joto, "Upaya Peningkatan Keandalan Penyalur dengan Manuver

Jaringan,” *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2023.

- [11] Ulfah Khairiyah Luthfiyani, Adi Setiawan, and Samsul Arifin, “Analisis Perbandingan Indeks Keandalan Sistem Jaringan Distribusi dengan Metode Section Technique dan Reliability Index Assessment (RIA): Studi Kasus Gardu Induk Balaraja,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 1, pp. 250–264, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i1.1782.
- [12] T. Sucita, M. Somantri, D. Fahrizal, and M. Agista, “Analisis Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik 20 kV pada Penyulang CWRU,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Informas*, vol. 13, no. November, pp. 282–289, 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i4.12510.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Evaluasi Kinerja dan Efektivitas CVT sebagai Sistem Transmisi pada Kendaraan Buggy 2WD

I Wayan Agus Rantia Dana^{1*}, I Made Anom Adiaksa¹, I Wayan Suma Wibawa¹ dan I Made Bagus Panji Aditya¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran, Badung, 80364, Indonesia

*Email: rantiadana@pnb.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi kendaraan ringan nonkonvensional, seperti mobil buggy, menuntut sistem pemindah daya yang efisien untuk mendukung mobilitas di kawasan industri yang padat. Salah satu teknologi yang diandalkan adalah *continuously variable transmission* (cvt). Namun, efektivitas penyaluran tenaga sering terhambat oleh ketidaksinkronan antara putaran mesin (rpm mesin) dan putaran roda (rpm roda) akibat faktor beban dan kehilangan energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif hubungan antara rpm mesin terhadap performa roda pada kendaraan buggy dengan variasi beban 3 kg hingga 8 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beban menyebabkan penurunan rpm roda secara signifikan pada seluruh rentang putaran mesin, sebagai contoh, pada rpm mesin 8000, rpm roda turun dari 515 rpm (beban 3 kg) menjadi 225 rpm (beban 8 kg). Sebaliknya, torsi roda mengalami peningkatan linear seiring bertambahnya beban, mencapai nilai tertinggi 15,8 nm pada beban 8 kg. Analisis efektivitas menunjukkan bahwa daya (*power*) yang dihasilkan cenderung meningkat seiring bertambahnya beban, dengan efektivitas tertinggi dicapai pada operasional rpm mesin rendah (5500 rpm) saat beban puncak. Hasil ini memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami perilaku mekanis cvt serta menjadi referensi teknis untuk optimasi penyetelan sistem transmisi pada kendaraan ringan guna mencapai keseimbangan antara torsi dan efisiensi daya.

Kata kunci: mobil buggy, cvt, rpm roda, torsi roda, efektivitas daya

Abstract: The development of non-conventional light vehicle technology, such as the buggy car, demands efficient and reliable power transfer systems to support mobility in congested industrial areas. One of the primary technologies utilized is the *continuously variable transmission* (cvt), which offers the advantage of changing transmission ratios continuously without the interruptions found in conventional gear shifting. However, in its application, an imbalance often occurs between the engine speed (rpm engine) and the wheel speed (rpm wheel) due to load factors and power losses. This study aims to comprehensively analyze the correlation between rpm engine and wheel performance on a buggy vehicle under varying loads ranging from 3 kg to 8 kg. Experimental results indicate that increasing the load leads to a significant decrease in wheel rpm across all engine speed ranges; for instance, at 8000 rpm engine, the wheel rpm dropped from approximately 515 rpm (3 kg load) to 225 rpm (8 kg load). Conversely, wheel torque exhibited a linear increase as the load rose, reaching a peak value of 15.8 nm at an 8 kg load. Effectiveness analysis shows that the output power (hp) tends to increase with the load, with the highest effectiveness achieved during lower engine speed operations (5500 rpm) at peak load. These findings provide a scientific contribution to understanding the mechanical behavior of cvts and serve as a technical reference for optimizing transmission tuning in light vehicles to achieve a balance between torque and power efficiency.

Keywords: buggy car, cvt, rpm wheel, wheel torque, power effectiveness

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi kendaraan bermotor saat ini mengalami kemajuan pesat, terutama pada kategori kendaraan ringan nonkonvensional seperti mobil buggy. Inovasi ini menuntut adanya sistem pemindah daya yang tidak hanya mampu menyalurkan tenaga secara efisien, tetapi juga memiliki tingkat keandalan tinggi dalam berbagai kondisi operasional [1]. Secara fungsional, mobil

buggy dirancang sebagai kendaraan kompak berkapasitas satu hingga empat penumpang yang mengedepankan mobilitas efisien. Dimensinya yang ringkas menjadikan kendaraan ini solusi transportasi ideal bagi area dengan ruang gerak terbatas, seperti kawasan industri atau area wisata dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi [2].

Dalam ekosistem kendaraan buggy, performa sistem transmisi memegang peranan krusial sebagai komponen utama yang mengelola penyaluran energi dari mesin menuju

roda penggerak. Keberhasilan penyaluran tenaga tersebut sangat bergantung pada korelasi antara putaran mesin (RPM mesin) dan putaran roda (RPM roda). Hubungan ini memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik performa kendaraan, khususnya dalam menentukan efektivitas akselerasi, pencapaian kecepatan maksimum, serta ketangguhan kendaraan saat menghadapi variasi kondisi medan yang dinamis [3]. Oleh karena itu, diperlukan teknologi transmisi yang mampu menjembatani kebutuhan torsi mesin dengan beban dinamis di roda secara fleksibel.

Untuk menjawab tantangan tersebut, teknologi Continuously Variable Transmission (CVT) menjadi opsi yang sangat relevan dan dianggap sebagai desain sistem transmisi ideal. Meskipun teknologi ini sudah digunakan sejak awal abad ke-20 pada mesin perkakas dan industri, CVT tetap menjadi pilihan utama karena kemampuannya mengubah rasio transmisi secara kontinu tanpa jeda perpindahan gigi konvensional [4]. Karakteristik transmisi rasio tak terbatas ini memungkinkan sistem secara otomatis memilih perbandingan gigi paling tepat untuk mengoptimalkan efisiensi energi serta kinerja kendaraan pada setiap kondisi pembebanan yang diberikan [5]. Selain fleksibilitas rasionya, CVT menawarkan berbagai keunggulan kompetitif dibandingkan unit transmisi manual maupun otomatis konvensional. Penggunaan CVT pada kendaraan ringan seperti buggy terbukti mampu menekan biaya produksi dan memberikan bobot kendaraan yang lebih ringan karena konstruksinya yang lebih sederhana. Dari sisi operasional, teknologi ini jauh lebih hemat bahan bakar dan memberikan kenyamanan berkendara melalui perubahan kecepatan yang halus tanpa hentakan (*shift shock*) [6]. Lebih jauh lagi, sistem ini mampu memberikan efek pengereman mesin (*engine brake*) yang lebih linear, yang sangat krusial bagi aspek keselamatan kendaraan saat beroperasi di medan industri yang bervariasi.

Namun, dalam penerapannya pada mobil buggy, peningkatan RPM mesinseringkali tidak diikuti oleh kenaikan RPM roda secara proporsional. Kondisi ini dipengaruhi oleh faktor kehilangan energi (*power losses*) yang terjadi pada sistem transmisi akibat gesekan antara sabuk (*belt*) dan puli (*pulley*), serta adanya fenomena selip pada mekanisme CVT [7]. Perbedaan putaran yang tidak sinkron ini menyebabkan efisiensi penyaluran tenaga menurun drastis, sehingga energi yang dihasilkan mesin terbuang menjadi panas. Hal ini berdampak langsung pada penurunan responsivitas akselerasi dan ketidakmampuan kendaraan dalam mempertahankan performa optimal saat membawa beban penuh.

Permasalahan efisiensi ini juga berpotensi menyebabkan konsumsi bahan bakar menjadi kurang ekonomis akibat mesin dipaksa bekerja di luar rentang operasi optimalnya secara terus-menerus. Dampak negatif lainnya adalah keausan dini pada komponen mekanis akibat panas berlebih yang dihasilkan dari perbedaan kecepatan putar yang tidak stabil antara input dan output transmisi [8]. Meskipun penelitian mengenai rasio transmisi pada kendaraan komersial telah banyak dilakukan, kajian yang secara mendalam mengevaluasi hubungan RPM mesin dan RPM roda pada kendaraan spesifik seperti buggy masih tergolong terbatas, terutama dalam konteks penggunaan di area industri.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara komprehensif pengaruh putaran mesin terhadap putaran roda pada kendaraan buggy dengan sistem transmisi CVT. Kajian ini difokuskan pada karakteristik penyaluran daya melalui sistem transmisi dalam kondisi variasi beban dan fluktuasi putaran mesin untuk mengukur efisiensi daya yang ditransmisikan [9]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami perilaku mekanis sistem pemindah daya nonkonvensional, serta menjadi referensi teknis dalam perancangan dan penyetalan transmisi agar efisiensi penyaluran tenaga dan performa kendaraan dapat ditingkatkan secara optimal.

1.2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana efektivitas daya (*Power/Effectiveness*) yang dihasilkan oleh sistem transmisi CVT saat menghadapi beban puncak pada variasi putaran mesin yang berbeda?
2. Berapakah efisiensi penyaluran tenaga yang optimal (keseimbangan antara RPM dan Torsi) agar mobil buggy tetap memiliki performa terbaik di kawasan industri yang padat?

1.3. Tujuan

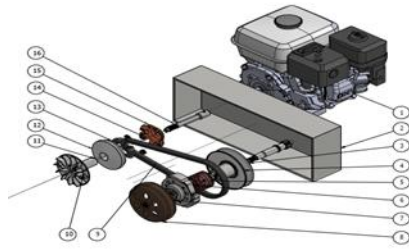
Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengevaluasi tingkat efektivitas daya (*Power*) yang dihasilkan oleh sistem transmisi CVT pada berbagai rentang RPM untuk menentukan performa optimal saat menghadapi beban puncak.
2. Mengidentifikasi karakteristik peningkatan torsi roda (*Wheel Torque*) secara linear seiring dengan penambahan beban operasional pada sistem transmisi CVT.

2. Metode dan Bahan

Metode penelitian yang diterapkan dalam studi ini adalah pendekatan eksperimental dengan menganalisis data yang disajikan dalam bentuk grafik. Grafik hasil pengujian selanjutnya dianalisis menggunakan metode deskriptif. Analisis deskriptif merupakan metode penelitian yang bertujuan untuk memberikan gambaran atau uraian mengenai karakteristik data berdasarkan hasil pengolahan data secara apa adanya, tanpa melakukan generalisasi atau penarikan kesimpulan yang bersifat umum [10]. Analisis deskriptif, yang juga dikenal sebagai analisis deduktif, merupakan bagian dari statistika yang mempelajari teknik pengumpulan serta penyajian data agar dapat dipahami dengan lebih mudah. Metode ini bertujuan untuk menjelaskan suatu keadaan, gejala, atau permasalahan berdasarkan kumpulan data yang tersedia, tanpa melakukan generalisasi terhadap populasi yang lebih luas. Analisis dilakukan terhadap perubahan putaran roda belakang akibat variasi beban yang diberikan, serta terhadap torsi yang mampu ditransmisikan dan didistribusikan ke roda belakang melalui sistem CVT. Rencana pemasangan cvt ditunjukkan pada gambar 1.

2.1 Desain



Gambar 1. Rencana pemasangan cvt

Keterangan gambar:

- 1) Mesin
- 2) Kotak CVT
- 3) Poros – Pulley Belakang
- 4) Pulley Belakang
- 5) CVT Spring
- 6) Clutch
- 7) Clutch Nut
- 8) CVT Clutch Bowl
- 9) V Belt
- 10) Pulley depan CVT
- 11) Boshing Pulley
- 12) Rollar Base
- 13) Roller
- 14) Piece Slide
- 15) Cup roller
- 16) Poros ke Mesin

Kendaraan *buggy* 2WD ini dirancang untuk mobilitas yang tangkas dengan bobot kosong hanya 100 kg, didukung oleh konfigurasi *wheelbase* 120 cm dan *wheel track* 80 cm, serta penggunaan roda berdiameter 40 cm. Performa kendaraan bersumber dari mesin General 4-tak OHV silinder tunggal berkapasitas 163 cc dengan pendingin udara. Unit mesin tersebut mampu menghasilkan daya maksimum 5,5 HP pada 3600 RPM. Penyaluran tenaga dioptimalkan oleh sistem transmisi *Dry Multiple Variable Speed* milik Vario 110 yang menggunakan *V-Belt Double Cog* seri KVB. Melalui integrasi puli primer 115 mm, puli sekunder 135 mm, serta enam buah *roller* 13 gram. Penerapan transmisi CVT pada penelitian ini menggunakan sistem penggerak roda belakang. Model CVT dipilih karena tidak memanfaatkan roda gigi konvensional, sehingga dapat memberikan kemudahan dalam pengoperasian kendaraan. Selain itu, sistem ini memiliki keunggulan dalam menyalurkan tenaga mesin secara adaptif sehingga memudahkan penyesuaian terhadap beban pada roda [11]. Kendaraan *buggy* yang dikembangkan diharapkan dapat berfungsi sebagai kendaraan operasional segala medan, yang dapat diaplikasikan untuk berbagai keperluan melalui penambahan perangkat atau alat pendukung sesuai kebutuhan.

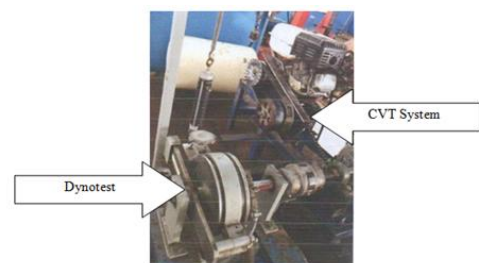
2.2 Instrumen Penelitian

Daya merupakan besaran yang menyatakan kerja yang dilakukan dalam satuan waktu tertentu. Pada mesin, daya dihasilkan melalui gerakan piston yang bergerak bolak-balik di dalam silinder sebagai bagian dari proses konversi energi menjadi tenaga mekanis [12]. Di dalam silinder mesin terjadi proses konversi energi primer, yakni transformasi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi

termal melalui pembakaran, yang kemudian diubah menjadi energi mekanik melalui gerak translasi piston [13]. Efisiensi proses ini sangat bergantung pada sistem pengapian yang memastikan pembakaran berlangsung secara kontinu dan stabil. Ketidaktepatan waktu pengapian (*ignition timing*), seperti keterlambatan beberapa derajat pada langkah kerja, dapat menyebabkan penurunan tekanan puncak silinder yang berujung pada merosotnya output daya mesin. Secara spesifik, daya indikatif merupakan parameter kunci yang menunjukkan total energi yang dihasilkan per satuan waktu di dalam ruang bakar untuk mengatasi seluruh beban operasional dan hambatan mekanis pada sistem [14]. Selama proses operasi, mesin terdiri atas berbagai komponen yang saling terintegrasi dan bekerja secara simultan sehingga membentuk suatu kesatuan sistem yang kompak. Daya indikatif yang dihasilkan mesin tidak hanya digunakan untuk menghasilkan tenaga keluaran, tetapi juga berperan dalam mengatasi beban internal yang berasal dari komponen-komponen penyusun mesin tersebut [15]. Beberapa komponen tersebut antara lain pompa air pada sistem pendingin, pompa oli pada sistem pelumasan, kipas radiator, serta komponen pendukung lainnya yang dikenal sebagai aksesoris mesin. Aksesoris ini dikategorikan sebagai beban parasitik karena menyerap sebagian daya dari daya indikatif yang dihasilkan mesin.

Penelitian ini menggunakan *Chassis Dyno* sebagai instrumen utama untuk mengukur output daya dan torsi pada roda. Selain itu, tachometer diaplikasikan untuk memantau putaran mesin (RPM) secara akurat. Metodologi penelitian menetapkan putaran mesin (rentang 5500–8000 RPM) dan pembebanan roda belakang (3–8 kg) sebagai variabel bebas. Sementara itu, torsi dan daya yang dihasilkan pada roda belakang berperan sebagai variabel terikat. Penggunaan metode *Chassis Dyno* dipilih secara spesifik guna mengevaluasi kinerja mekanis sistem transmisi CVT dalam menyalurkan tenaga secara langsung.

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sistem penggerak kendaraan ke alat *dynotest*. Mekanisme penerusan daya menggunakan sistem rantai dan sproket dengan rasio 14:34. Sistem rantai ini dipilih untuk mempermudah penerapannya pada kendaraan *buggy*. Sproket dengan jumlah gigi 14 dipasang pada sisi keluaran (*output*) CVT, sedangkan sproket dengan jumlah gigi 34 dipasang pada poros roda belakang. Pengujian dengan *dynotest* dapat dilihat pada gambar 2.



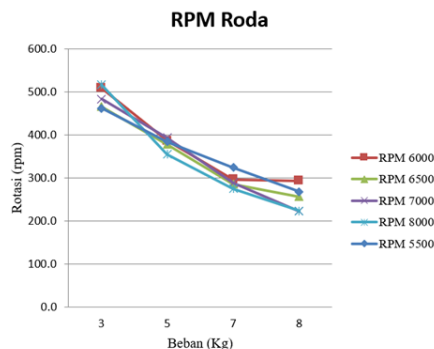
Gambar 2. Pengujian dengan *dynotest*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Rotasi Roda Belakang

Pengujian dilakukan secara berulang guna memperoleh data yang lebih akurat dan kredibel. Proses pengambilan data difokuskan pada kecepatan rotasi yang dihasilkan pada roda belakang, serta torsi yang muncul sesuai variasi beban yang

diberikan, sehingga daya yang ditransmisikan ke roda belakang kendaraan buggy dapat dihitung secara tepat. Siklus rotasi memiliki hubungan yang erat dengan pembebanan pada roda belakang, di mana peningkatan beban menyebabkan penurunan jumlah siklus rotasi, dan sebaliknya [16]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembebanan pada pengujian ini berpengaruh signifikan terhadap siklus rotasi yang dihasilkan. Semakin besar beban yang diterapkan, semakin rendah jumlah siklus rotasi yang terjadi. Hubungan antara beban dan rotasi menunjukkan korelasi linier, di mana peningkatan beban menyebabkan penurunan rotasi, sedangkan penurunan beban akan meningkatkan jumlah rotasi yang dihasilkan.



Gambar 3. Grafik putaran roda belakang (rpm)

Gambar 3 memperlihatkan hasil pengukuran rotasi yang terjadi pada roda belakang sebagai respons terhadap variasi kecepatan mesin dan besarnya beban yang diterapkan. Pada putaran mesin sebesar 5500 rpm, rotasi roda belakang menunjukkan kecenderungan menurun dari 426,4 rpm menjadi 268 rpm seiring dengan meningkatnya beban yang diberikan. Pada pembebanan 3 kg, roda belakang mampu mencapai rotasi maksimum sebesar 426,4 rpm. Namun, ketika beban dinaikkan menjadi 5 kg, rotasi mengalami penurunan menjadi 384,8 rpm. Penurunan ini semakin terlihat pada beban 7 kg, di mana roda belakang hanya menghasilkan putaran sebesar 324,6 rpm. Pada kondisi beban tertinggi, yaitu 8 kg, rotasi roda belakang turun secara signifikan hingga mencapai 268,4 rpm. Hasil tersebut mengindikasikan adanya hubungan berbanding terbalik antara besarnya beban dan rotasi roda belakang, di mana peningkatan beban menyebabkan penurunan kemampuan sistem dalam mempertahankan kecepatan putaran.

Pada putaran mesin sebesar 6000 rpm, rotasi roda belakang mengalami penurunan dari 466 rpm menjadi 283,6 rpm seiring dengan peningkatan beban yang diterapkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembebanan yang lebih besar menyebabkan berkurangnya kemampuan roda belakang dalam mempertahankan kecepatan rotasi, akibat meningkatnya kebutuhan torsi untuk mengatasi gaya resistif yang bekerja pada sistem. Dengan demikian, semakin tinggi beban yang diberikan, semakin rendah rotasi roda yang dihasilkan meskipun mesin beroperasi pada putaran yang relatif tinggi. Secara rinci, pada beban 3 kg roda belakang mampu berputar hingga 509,2 rpm. Ketika beban ditingkatkan menjadi 5 kg, rotasi menurun menjadi 386,6 rpm. Selanjutnya, pada beban 7 kg roda hanya menghasilkan rotasi sebesar 297 rpm, dan pada beban maksimum 8 kg rotasi turun hingga 283,6 rpm.

Sementara itu, pada kecepatan mesin 6500 rpm, pola penurunan rotasi roda belakang juga terlihat jelas, di mana

rotasi menurun dari 466 rpm menjadi 256,6 rpm seiring dengan bertambahnya beban. Pada beban 3 kg, roda belakang berputar hingga 466 rpm, kemudian menurun menjadi 378,6 rpm pada beban 5 kg. Penurunan lebih lanjut terjadi pada beban 7 kg dengan rotasi sebesar 285,6 rpm, dan pada beban 8 kg roda hanya mampu berputar hingga 256,6 rpm. Hasil ini menegaskan adanya hubungan berbanding terbalik antara beban dan rotasi roda belakang, di mana peningkatan beban menyebabkan penurunan rotasi akibat meningkatnya torsi yang dibutuhkan untuk mempertahankan putaran serta berkurangnya daya efektif yang dapat ditransmisikan ke roda.

Pada kecepatan mesin sebesar 7000 rpm, rotasi roda belakang mengalami penurunan dari 483,6 rpm menjadi 222,8 rpm seiring dengan peningkatan beban yang diterapkan. Pada pembebanan 3 kg, roda belakang mampu menghasilkan putaran maksimum hingga 483,6 rpm. Namun, ketika beban dinaikkan menjadi 5 kg, rotasi menurun menjadi 394 rpm. Penurunan rotasi semakin signifikan pada beban 7 kg, di mana roda belakang hanya berputar hingga 289,4 rpm. Pada beban tertinggi, yaitu 8 kg, rotasi roda belakang turun drastis hingga mencapai 222,6 rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan beban memberikan pengaruh langsung terhadap penurunan kecepatan rotasi roda belakang, yang mengindikasikan adanya kebutuhan torsi yang lebih besar untuk mengatasi gaya resistif pada sistem transmisi.

Pada kecepatan mesin sebesar 8000 rpm, rotasi roda belakang mengalami penurunan dari 516,6 rpm menjadi 223,8 rpm seiring dengan peningkatan beban yang diterapkan. Pada pembebanan 3 kg, roda belakang mampu menghasilkan putaran maksimum hingga 516,6 rpm. Namun, ketika beban ditingkatkan menjadi 5 kg, rotasi roda menurun menjadi 354,4 rpm. Penurunan rotasi berlanjut pada beban 7 kg, di mana roda belakang hanya berputar hingga 275 rpm. Pada beban tertinggi, yaitu 8 kg, rotasi roda belakang turun secara signifikan hingga mencapai 223,8 rpm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, semakin rendah rotasi roda belakang yang dihasilkan, yang mengindikasikan meningkatnya kebutuhan torsi serta adanya pengaruh gaya resistif terhadap kinerja sistem transmisi pada putaran mesin tinggi.

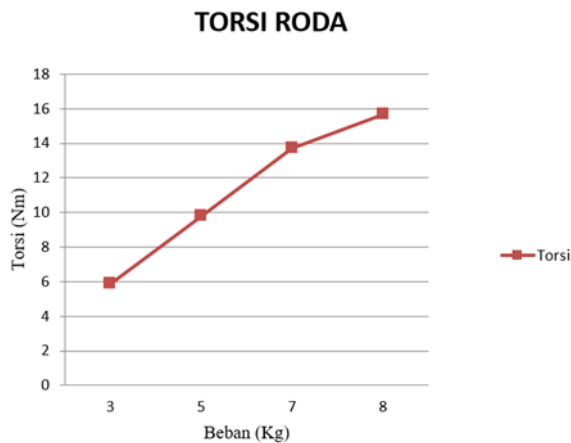
Penurunan rotasi roda belakang memiliki keterkaitan erat dengan peningkatan beban yang diberikan pada sistem [17]. Semakin besar beban yang diterapkan, semakin besar pula torsi yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya resistif, sehingga putaran roda cenderung menurun. Kondisi ini menyebabkan daya efektif yang ditransmisikan melalui sistem penggerak menjadi berkurang, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kecepatan operasional kendaraan buggy. Dengan demikian, peningkatan beban tidak hanya memengaruhi rotasi roda belakang, tetapi juga kinerja keseluruhan sistem transmisi dan kemampuan kendaraan dalam mempertahankan kecepatan pada berbagai kondisi pembebanan.

3.2. Torsi Roda Belakang

Berdasarkan hasil analisis teoritis serta pengujian empiris terhadap parameter daya dan torsi, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kecepatan mesin berbanding lurus dengan besarnya daya yang dihasilkan oleh kendaraan. Semakin tinggi putaran mesin, semakin besar energi mekanik yang dapat dikonversikan menjadi daya untuk mendukung kinerja kendaraan [18]. Hasil pengujian pada

roda belakang menunjukkan terjadinya penurunan daya dan torsi setelah diberikan variasi pembebanan. Beban yang diterapkan pada roda belakang menyebabkan meningkatnya gaya resistif yang harus dilawan oleh sistem penggerak, sehingga putaran mesin (rpm) mengalami penurunan. Kondisi ini berdampak langsung pada menurunnya kemampuan mesin dalam mempertahankan output torsi serta daya yang ditransmisikan menuju roda belakang. Ketika beban pada roda belakang meningkat, rotasi roda cenderung mengalami penurunan. Namun, untuk mempertahankan kemampuan penggerak, kecepatan mesin perlu ditingkatkan agar roda belakang tetap dapat berputar. Torsi yang dihitung pada roda belakang merupakan respons langsung terhadap pembebanan yang diberikan, di mana semakin besar beban, semakin besar pula torsi yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya resistif dan menjaga kinerja sistem penggerak. Perhitungan torsi dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter utama, yaitu besarnya beban yang diberikan (dalam satuan kg), percepatan gravitasi, serta radius patahan cakram pada alat dynotest yang digunakan.

Variasi beban yang diterapkan dalam pengujian meliputi 3 kg, 5 kg, 7 kg, dan 8 kg. Radius patahan cakram dynotest diketahui sebesar 20 cm. Nilai torsi yang dihasilkan dari perhitungan tersebut kemudian disajikan sesuai dengan gambar 4.



Gambar 4. Grafik torsi roda belakang

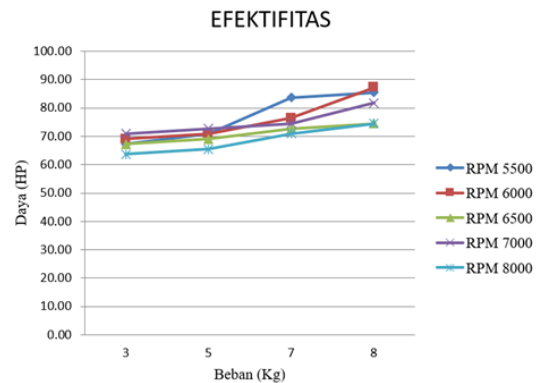
Hubungan antara beban dan torsi bersifat berbanding lurus, di mana peningkatan beban akan menghasilkan torsi yang semakin besar [19]. Sebaliknya, hubungan antara torsi dan rotasi roda menunjukkan kecenderungan berbanding terbalik, sehingga semakin besar torsi yang dihasilkan akibat pembebanan, semakin rendah rotasi roda yang terjadi. Secara kuantitatif, pada pembebanan 3 kg diperoleh torsi sebesar 5,88 Nm. Ketika beban ditingkatkan menjadi 5 kg, torsi yang dihasilkan meningkat menjadi 9,8 Nm. Selanjutnya, pada beban 7 kg torsi mencapai 13,72 Nm. Nilai torsi terbesar diperoleh pada pembebanan 8 kg, yaitu sebesar 15,68 Nm.

3.3. Efektivitas

Efektivitas dapat diartikan sebagai tingkat keaktifan, kegunaan, serta kesesuaian suatu aktivitas dalam melaksanakan tugas untuk mencapai target yang telah ditetapkan. Secara umum, efektivitas menitikberatkan pada pencapaian hasil yang diharapkan, dan sering dikaitkan dengan konsep efisiensi, meskipun keduanya memiliki perbedaan mendasar [20]. Efektivitas menggambarkan

sejauh mana suatu pekerjaan dapat menghasilkan output sesuai dengan tujuan yang direncanakan.

Dalam penelitian ini, efektivitas diperoleh dari rasio antara daya yang dihasilkan oleh mesin penggerak dengan daya yang diteruskan ke roda belakang melalui sistem CVT. Nilai efektivitas tersebut juga dipengaruhi oleh besarnya beban yang diberikan pada roda belakang, karena pembebanan akan memengaruhi kemampuan transmisi dalam menyalurkan daya secara optimal. Efektivitas sistem CVT sebagai sumber penyalur daya selanjutnya ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik efektivitas

Efektivitas daya didefinisikan sebagai besarnya daya yang mampu ditransmisikan dari penggerak utama menuju objek yang digerakkan[20]. Dalam konteks ini, efektivitas sangat dipengaruhi oleh beban yang diberikan pada objek yang dipindahkan, karena pembebanan akan menentukan seberapa optimal sistem mampu menyalurkan daya.

Pada penelitian ini, efektivitas yang dianalisis adalah efektivitas sistem CVT dalam mentransmisikan daya dari mesin penggerak ke roda belakang. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa efektivitas daya yang ditransmisikan pada putaran mesin 5500 rpm sebesar 70,6%, pada 6000 rpm sebesar 72,1%, pada 6500 rpm sebesar 67,1%, pada 7000 rpm sebesar 66%, dan pada 8000 rpm sebesar 64,3%. Secara keseluruhan, efektivitas rata-rata daya yang ditransmisikan oleh sistem CVT adalah sebesar 68%. Hal ini berarti bahwa dari total daya mesin penggerak sebesar 5,5 hp, daya yang berhasil diteruskan ke roda belakang hanya sekitar 3,74 hp, sedangkan sisanya mengalami kehilangan daya akibat gesekan, slip, serta faktor mekanis lainnya dalam sistem transmisi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian sistem CVT yang digunakan sebagai penerus daya dari mesin penggerak ke roda belakang kendaraan buggy, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Efektivitas Daya pada Beban Puncak Analisis efektivitas daya (Power/Effectiveness) menunjukkan fenomena teknis yang signifikan di mana operasional pada putaran mesin rendah (RPM_mesin 5500) justru memberikan tingkat efektivitas tertinggi saat diberikan beban puncak (8 kg) dibandingkan dengan putaran mesin tinggi (RPM_mesin 8000). Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi beban berat, penggunaan RPM tinggi memicu kerugian daya (power losses) yang lebih besar akibat peningkatan suhu dan potensi selip pada sabuk transmisi (V-belt). Sebaliknya, pada RPM rendah, sistem CVT mampu

menjaga cengkaman dan penyaluran tenaga yang lebih stabil, sehingga menghasilkan efektivitas kerja yang lebih optimal untuk mendorong beban maksimal.

2. Efisiensi penyaluran tenaga yang paling optimal pada mobil buggy dicapai melalui keseimbangan antara torsi tinggi dan putaran mesin menengah. Data menunjukkan bahwa Wheel Torque mengalami peningkatan linear hingga mencapai puncaknya sebesar 15,8 Nm pada beban 8 kg, sementara Wheel RPM cenderung menurun drastis saat beban bertambah. Performa terbaik diperoleh dengan melakukan penyetelan (tuning) transmisi yang berfokus pada penguatan torsi di rentang putaran 5500 RPM hingga 6500 RPM. Keseimbangan ini memastikan kendaraan tetap memiliki daya dorong yang kuat untuk bermanuver dengan beban muatan, namun tetap mempertahankan efisiensi konsumsi energi dan meminimalkan keausan komponen mekanis.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada rekan sejawat, teknisi, serta mahasiswa yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama proses pengambilan data penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali atas dukungan fasilitas yang diberikan, baik dalam pelaksanaan pengambilan data, pengolahan data, maupun kesempatan untuk mempublikasikan hasil penelitian dalam bentuk karya ilmiah.

Daftar Pustaka

- [1] F. P. Diharja, Mochammad Arif Irfa'i, and Mohammad Munib Rosadi, "Analisis Pengaruh Variasi Diameter Driven Pulley Terhadap Output Kecepatan Putar dan Torsi Akhir pada Trainer Transmisi Toyota Kijang Innova E 2.0 M/T," *J. Tek. Media Pengemb. Ilmu dan Apl. Tek.*, vol. 21, no. 1, pp. 32–41, 2022, doi: 10.55893/jt.vol21no1.193.
- [2] E. Edison and D. Delwita, "Perancangan Rangka Body Mobil Buggy Untuk Satu Orang Penumpang," *Rang. Tek. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 2–5, 2019, doi: 10.31869/rtj.v2i2.1433.
- [3] A. Awaluddin, Syafri, K. Anuar, and Nazaruddin, "Analisis Kinerja Sistem Transmisi Pada Mobil Hemat Energi Tipe Hybrid," *Semin. Nas. ITENAS*, pp. 35–41, 2018.
- [4] D. W. Ge, S. Ariyono, and D. T. T. Mon, "A Review on Continuously Variable Transmissions Control," *Natl. Conf. Mech. Eng. Res.*, vol. 9501, no. May, pp. 543–554, 2010.
- [5] R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens, R. Najork, and B. Pollak, *The automotive transmission book*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-05263-2.
- [6] E. C. Yos Nofendri, "Pengaruh Berat Roller Terhadap Performa Mesin Yamaha Mio Soul 110 Cc Yang Menggunakan Jenis Transmisi Otomatis (CVT)," *J. Kaji. Tek. Mesin*, vol. 5 no1, pp. 58–65., 2020, doi: <https://doi.org/10.52447/jktm.v5i1.3991>.
- [7] James Domu Siburian, "Analisa slip transmisi pulley dan v-belt pada beban tertentu dengan menggunakan motor," *Tek. Mesin, Univ. Islam Riau*, pp. 1–85, 2019, [Online]. Available: <https://repository.uir.ac.id/1895/1/143310632.pdf>
- [8] A. Kot, W. Grzegozek, and W. Szczypiński-Sala, "The analysis of an influence of rubber V-belt physical properties on CVT efficiency," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 421, no. 2, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/421/2/022017.
- [9] R. Rasyad and I. N. Sutantra, "Analisis dan Studi Eksperimen Perbandingan Transmisi Manual dengan Transmisi CVT pada Mobil Honda Jazz 2018, Berdasarkan Karakteristik Traksi dan Efisiensi Transmisi," *J. Tek. ITS*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v8i1.42492.
- [10] C. M. Zellatifanny and B. Mudjiyanto, "Tipe Penelitian Deskriptif Obat Generik," *J. Diakom*, vol. 1, no. 2, pp. 83–90, 2018.
- [11] N. A. Handoyono and S. Purnomo, "Teknologi Chasis Otomotif," *Insa. Cendekia Mandiri*, pp. 42–44, 2020.
- [12] Ahmad Yani, "Analisis Putaran Mesin Diesel 16 Silinder Menggunakan Alat Dynamometer Terhadap Torsi Mesin, Daya Mesin Dan Komsumsi Bahan Bakar," *Anal. Putaran Mesin Diesel 16 Silinder Menggunakan Alat Dynamom. Terhadap Torsi Mesin, Daya Mesin Dan Komsumsi Bahan Bakar*, vol. 2, no. 10, pp. 162–174, 2022.
- [13] R. C. Hartantrie, I. Gede Eka Lesmana, A. T. Riyadi K, R. Abdu Rahman, and A. Nugroho, *Motor Bakar Pada Mesin Hanverst Energi*. 2022. [Online]. Available: www.penerbitwidina.com
- [14] Willard W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed*. 2004.
- [15] JHON B.HEYWOOD, "John Heywood - Internal Combustion Engine Fundamentals-McGraw-Hill Education (2018)," 2018.
- [16] A. M. M. Daniel, "Desain Dan Implementasi Sistem Konversi Motor Bensin Menjadi Motor Listrik Padakendaraan Roda Dua," *Desain Dan Implementasi Sist. Konversi Mot. Bensin Menjadi Mot. List. Pada Kendaraan Roda Dua*, pp. 1–79, 2023, [Online]. Available: <https://dspace.uir.ac.id/handle/123456789/47771.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] T. A. Pambudi, G. E. Pramono, and D. Yuliaji, "Analisa Sistem Roda Gigi Diferensial Penggerak Roda Belakang Kendaraan Mobil Listrik (Iksha)," *Almikanika*, vol. 1, no. 1, pp. 27–34, 2019, doi: 10.32832/almikanika.v1i1.2009.
- [18] L. D. Yuono and E. Budiyanto, "Pengaruh perubahan sudut camshaft terhadap performa mesin sepeda motor sebagai upaya efisiensi energi," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 78–86, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i1.1162.
- [19] A. Wahid Ibrahim, T. Wahyu Widodo, and T. Wahyu Supardi, "Sistem Kontrol Torsi pada Motor DC," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.)*, vol. 6, no. 1, p. 93, 2016, doi: 10.22146/ijeis.10775.
- [20] D. R. Wibowo, "Upaya Peningkatan Efektivitas Mesin Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (Oee) Dan Failure Mode and Effect Analysis (Fmea) Mesin Toyo T235 Grinding," *J.*

Ilm. Tek. dan Manaj. Ind., pp. 1–75, 2023.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Comparative Study of Chemically Treated Agel Fiber-Reinforced Composites under Flexural Loading

I Wayan Padma Yogi Asana^{1*}, Komang Widhi Widantha¹ dan Risa Nurin Baiti¹

¹Department of Mechanical Engineering, Politeknik Negeri Bali, Badung, 80364, Indonesia

*Email: iwpadmayogi@pnb.ac.id

Abstract

Natural fiber composites are gaining attention as eco-friendly substitutes for synthetic fiber composites due to their renewability, reduced environmental footprint, and potential biodegradability. Nevertheless, the inherent hydrophilicity of natural fibers often leads to weak interfacial bonding with polymer matrices, which can compromise mechanical properties. This study examines the influence of NaOH and citric acid surface treatments on Agel fiber-reinforced composites produced via the hand layup technique, with flexural strength serving as the primary performance indicator. Three composite groups were prepared, untreated Agel fiber, NaOH-treated Agel fiber, and citric acid-treated Agel fiber. The specimens were cut and tested in bending, and the results were analyzed using normality testing, equal variance testing, one-way ANOVA, and Tukey pairwise comparison. The average flexural bending strengths of the untreated, citric acid-treated, and NaOH-treated composites were 36.922 MPa, 37.784 MPa, and 40.611 MPa, respectively. The statistical assumptions for parametric analysis were satisfied, with the data in each group showing normal distribution and equal variance confirmed. One-way ANOVA indicated a significant difference among the three groups ($F = 7.24$, $p = 0.005$). Tukey pairwise comparison showed that the NaOH-treated composite was significantly different from both the untreated composite ($p = 0.005$) and the citric acid-treated composite ($p = 0.031$), while the difference between untreated and citric acid-treated composites was not significant ($p = 0.678$). These results indicate that NaOH treatment is more effective than citric acid treatment in improving the flexural performance of Agel fiber composites under the conditions used in this study. The improvement is attributed to better fiber to matrix interfacial bonding caused by surface modification of the fiber. This study supports the potential of Agel fiber as a sustainable reinforcement material for composite applications.

Keywords: agel fiber, natural fiber composite, NaOH treatment, citric acid treatment, flexural strength

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Introduction

Natural fiber composites have attracted increasing interest as environmentally sustainable substitutes for synthetic fiber composites due to their renewability, biodegradability, and relatively low ecological impact. In comparison to glass and carbon fiber composites, they typically demand less energy during manufacturing, contribute to lower greenhouse gas emissions, and present more favorable options for disposal or recycling at the end of their lifecycle. As a result, their adoption is growing across sectors such as automotive, construction, aerospace, marine, and consumer goods, particularly in applications where both lightweight characteristics and environmental considerations are critical [1], [2], [3]. However, despite these advantages, natural fibers still face several limitations, including variability in properties, moisture sensitivity, and lower thermal stability [1], [4], [5]. Therefore, further research is essential to enhance the performance of natural fiber composites while preserving their environmental advantages.

A key challenge in natural fiber composites is the weak interfacial bonding between the fiber surface and the

polymer matrix. Natural fibers are inherently hydrophilic due to their cellulose-based composition, whereas most polymer matrices are hydrophobic. This incompatibility frequently results in poor adhesion, inefficient stress transfer, increased moisture absorption, and diminished mechanical properties. To address this problem, surface treatment techniques are commonly used to modify the fiber surface, remove impurities, increase roughness, and introduce functional groups that improve compatibility with the matrix. Among the most widely studied treatments are alkaline treatment using sodium hydroxide (NaOH) and chemical modification using citric acid (CA) [6], [7], [8], [9], [10].

Agel fiber, which is derived from the Agave plant, is one of the promising natural fibers for composite reinforcement. It has attracted interest because of its availability, low cost, and mechanical potential. Previous studies have shown that Agel fiber can be used in environmentally friendly composite products such as boat structures and hybrid composites. Its performance can be improved further through surface treatment and composite design.

Specifically, alkaline treatment using NaOH has been shown to eliminate surface impurities such as lignin, hemicellulose, and waxes, thereby enhancing surface roughness and promoting better fiber–matrix adhesion. Nevertheless, excessive NaOH concentration or treatment time may damage the fiber structure and reduce mechanical performance, so careful control of treatment conditions is important [11], [12], [13].

Citric acid treatment has gained attention as an eco-friendly and sustainable approach to enhancing the surface properties of lignocellulosic fibers. Through esterification, citric acid reacts with hydroxyl groups on the fiber surface, thereby decreasing hydrophilicity and improving interfacial adhesion with polymer matrices. This treatment may also improve moisture resistance, thermal stability, and load transfer within the composite. For agave-like fibers, citric acid has shown potential to clean the surface, alter chemical functionality, and support stronger bonding with polymer systems [8], [10]. Because of these benefits, citric acid offers an interesting comparison with traditional alkali treatment in the modification of Agel fiber.

In composite manufacturing, the hand layup method remains one of the most accessible and practical fabrication techniques, especially for experimental studies. It allows fibers to be arranged manually with the matrix material, making it suitable for investigating the influence of fiber treatment on composite behavior [14]. In this study, untreated Agel fiber, NaOH-treated Agel fiber, and citric acid-treated Agel fiber are used to fabricate composites through hand layup. The resulting composite specimens are then cut and subjected to bending tests to evaluate their flexural performance. Bending behavior is a critical indicator of composite quality because it reflects the ability of the material to resist deformation and carry loads under service conditions.

This research is important because it compares three fiber conditions within the same composite fabrication process, allowing the effect of surface treatment on flexural performance to be examined more clearly. By comparing untreated fiber with chemically treated fibers, the study can show how NaOH and citric acid influence interfacial bonding, stiffness, and overall bending strength. The results are expected to enhance understanding of how Agel fiber can be optimized for composite applications and to support the development of more sustainable materials for structural and semi-structural purposes.

The main objective of this study is to investigate the effect of NaOH and citric acid treatments on Agel fiber reinforced composites produced by hand layup, with particular focus on bending test performance. The study also aims to compare the mechanical behavior of untreated, NaOH-treated, and citric acid-treated fiber composites in order to determine which treatment provides the most effective improvement. Through this study, the research aims to advance the development of natural fiber composites that are both environmentally sustainable and mechanically reliable.

Overall, this study is positioned within the broader effort to replace conventional synthetic reinforcement with renewable fiber alternatives. By focusing on Agel fiber and comparing two different chemical treatments, the research contributes to the ongoing development of natural fiber composites with improved interfacial properties and better

mechanical performance. The results may serve as a reference for future studies on fiber treatment optimization, composite fabrication, and the use of Agel fiber in practical engineering applications.

2. Material and Method

The materials used in this study consisted of natural fiber reinforcement, chemical treatment agents, and a polymer matrix. Plain-weave agel fiber was used as the reinforcing material and was obtained from local store. The single fibers had a thickness of 0.5 mm and a width of 1.5 mm. Citric acid (CA) was used as an eco-friendly chemical treatment obtained from local chemical store, and applied at 5% wight in distilled water. Sodium hydroxide (NaOH) was used as the alkaline treatment agent, supplied by local chemical store, and used at the same molarity as the citric acid solution. The polymer matrix used in this study was commercially available clear epoxy resin, with a resin-to-hardener weight ratio of 2:1.

The woven agel fibers were cut into 170 mm × 17 mm and immersed in either NaOH or citric acid solution, stirred continuously using magnetic stirrer for 2 hours, then rinsed and oven-dried.

Dried woven agel fiber then placed into silicone mold. The epoxy resin and hardener mixture then added evenly in 8 plies of woven agel fiber to make the composite with 90% weight ratio of resin-hardener mixture. After curing, the composite plates were demolded and cut into 170 mm × 25 mm (length × width). Three-point bending test were conducted on an 80 mm support span in accordance with ASTM D790.

3. Result and Discussion

3.1. Result

The bending test was conducted to evaluate the flexural performance of Agel fiber-reinforced composites with three different conditions, untreated fiber, NaOH-treated fiber, and citric acid-treated fiber. The average flexural strength of the untreated composite was found to be 36.922 MPa, while the citric acid-treated composite showed 37.784 MPa, and the NaOH-treated composite exhibited a value of 40.611 MPa as shown in Figure 1.

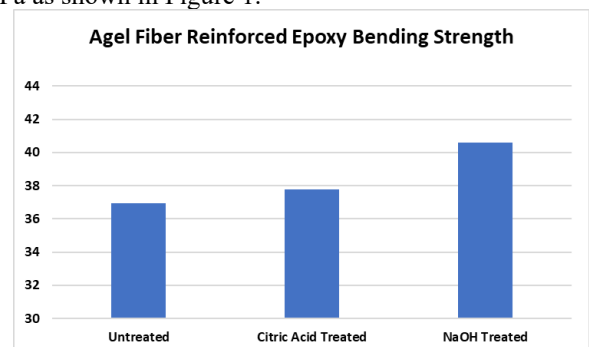


Figure 1. Agel fiber reinforced epoxy bending strength comparison from different treatment

Based on these results, the NaOH-treated composite showed the highest flexural bending strength, followed by the citric acid-treated composite, while the untreated composite exhibited the lowest value. This trend indicates that chemical treatment improved the bending performance of the Agel fiber composites, with NaOH treatment giving

the most pronounced increase under the conditions used in this study.

The improvement in flexural strength after chemical treatment may be explained by better fiber–matrix adhesion. In untreated fiber composites, the presence of surface impurities such as waxes, hemicellulose, and lignin can weaken interfacial bonding and reduce stress transfer during bending. After NaOH treatment, some of these non-cellulosic constituents are partially removed, resulting in a rougher fiber surface and better mechanical interlocking with the matrix [15], [16]. Citric acid treatment may also enhance adhesion through surface modification and possible esterification reactions, although the improvement in bending strength was smaller than that of NaOH-treated specimens in this study [10], [17], [18]. The difference among the three groups suggests that the type of chemical treatment has a measurable effect on the load-carrying capability of the composite during flexural loading.

A one-way analysis of variance (ANOVA) was conducted to assess whether the differences in mean flexural bending strength among the three composite groups were statistically significant. Prior to the ANOVA, the data were evaluated using normality and equal variance tests to confirm that the assumptions for parametric analysis were met.

The normality test showed that the data for each group were normally distributed, with p-values of 0.107, >0.150, and >0.150 for the untreated, citric acid-treated, and NaOH-treated composites, respectively as shown in Figure 2.

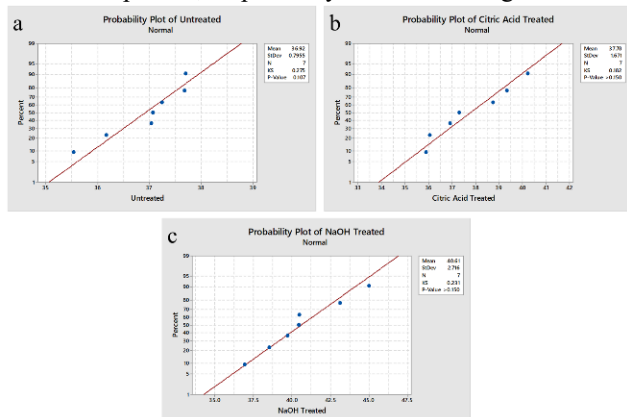


Figure 2. Normality test for a) untreated; b) citric acid treated; c) NaOH treated

Figure 3 showed the equal variance test also indicated that the assumption of homogeneity of variance was satisfied, with a test result of Multiple Comparisons and Lavene's Test's p-value of 0.076 and 0.132 respectively.

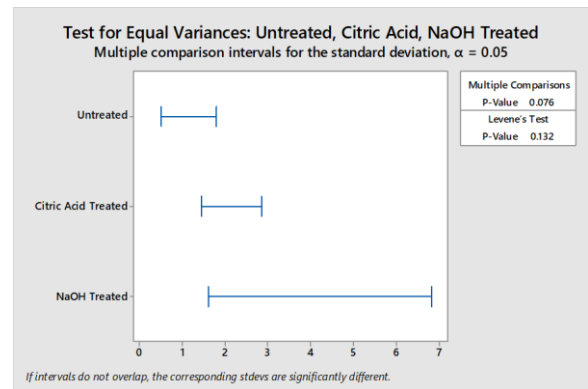


Figure 3. Test for equal variance of untreated, citric acid treated, and NaOH treated sample

Since the assumptions for parametric testing were satisfied, a one-way ANOVA was used to compare the mean flexural strengths of the three groups. The analysis yielded an F-value of 7.24 and a p-value of 0.005, indicating a statistically significant difference in flexural bending strength among the treatment groups as shown in Figure 4.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	52.15	26.073	7.24	0.005
Error	18	64.81	3.601		
Total	20	116.96			

Figure 4. Analysis of variance result

This means that the chemical treatment condition had a statistically significant effect on the bending strength of the Agel fiber composites.

To identify which groups differed significantly from one another, Tukey pairwise comparison test was conducted after the ANOVA. The comparison between untreated and citric acid-treated composites produced a p-value of 0.678, indicating that the difference was not significant. The comparison between untreated and NaOH-treated composites produced a p-value of 0.005, showing that the difference was significant. The comparison between citric acid-treated and NaOH-treated composites produced a p-value of 0.031, which suggests that the difference was significant as shown in Figure 5.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means					
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
Citric Acid - Untreated	0.86	1.01	(-1.73, 3.45)	0.85	0.678
NaOH Treated - Untreated	3.69	1.01	(1.10, 6.28)	3.64	0.005
NaOH Treated - Citric Acid	2.83	1.01	(0.24, 5.42)	2.79	0.031

Individual confidence level = 98.00%

Figure 5. Tukey pairwise comparison test result

The Tukey test results indicate that the NaOH-treated composite is significantly different from the untreated and citric acid-treated composites, while no significant difference exists between untreated and citric acid-treated composites. In general, the NaOH-treated composite had the highest bending strength and showed the greatest improvement relative to the untreated composite as shown in Figure 6.

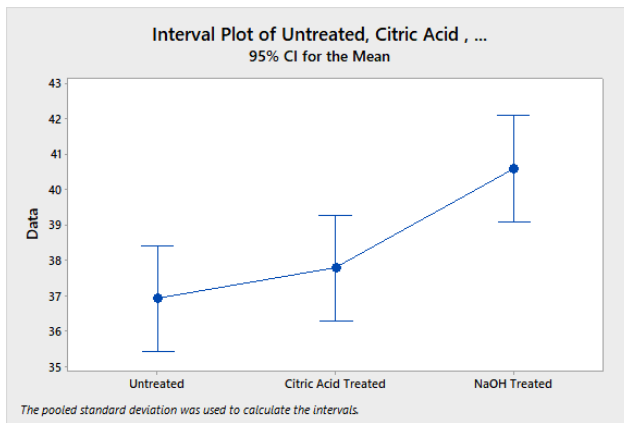


Figure 6. Interval plot of flexural bending test for each treatment

The citric acid-treated composite also showed a slight increase over the untreated specimen, but the improvement was smaller than that of NaOH treatment. This suggests that NaOH was more effective than citric acid in improving the interfacial bonding and load transfer capability of the Agel fiber composite under bending load.

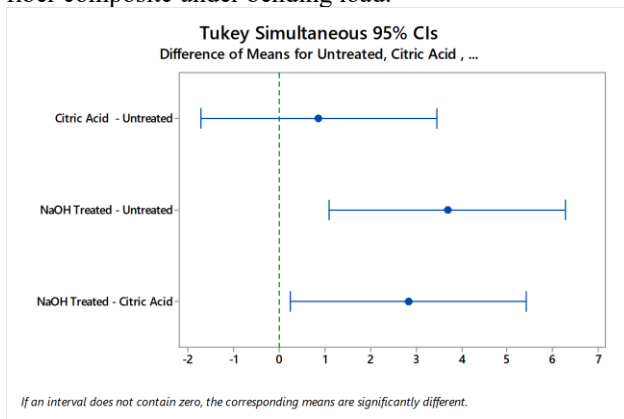


Figure 7. Tukey simultaneous 95% confidence interval

The Tukey simultaneous 95% confidence interval analysis was used to identify which pairwise differences in flexural bending strength were statistically meaningful after the one-way ANOVA. As shown in Figure 7, the comparison between the untreated composite and the citric acid-treated composite produced a confidence interval of -1.72678 to 3.45144, which included zero, indicating that the difference between these two groups was not statistically significant. In contrast, the comparison between the untreated composite and the NaOH-treated composite produced a confidence interval of 1.10032 to 6.27854, which did not include zero, showing a significant difference in bending strength. Similarly, the comparison between the citric acid-treated composite and the NaOH-treated composite produced a confidence interval of 0.237987 to 5.41621, which also excluded zero, confirming a significant difference between these two treatment groups.

These confidence interval results are consistent with the Tukey pairwise p-values and support the conclusion that NaOH treatment provides the greatest improvement in flexural bending strength. The interval for untreated versus citric acid-treated composites crossing zero indicates that citric acid treatment did not produce a strong enough improvement to be distinguished statistically from the untreated condition. On the other hand, the intervals for

comparisons involving NaOH treatment were entirely away from zero, which means that NaOH treatment significantly enhanced the composite's bending performance. This suggests that NaOH was more effective in improving fiber to matrix interfacial bonding, leading to better stress transfer under flexural loading, while citric acid treatment showed only a limited effect under the treatment conditions used in this study.

3.2. Discussion

The results of this study clearly demonstrate that chemical treatment has a measurable effect on the flexural bending strength of Agel fiber-reinforced composites. Based on the experimental data, the untreated composite exhibited a mean flexural strength of 36.922 MPa, the citric acid-treated composite showed a slight increase to 37.784 MPa, and the NaOH-treated composite achieved the highest value of 40.5 MPa. This trend indicates that surface modification improves the mechanical performance of the composite, although the degree of improvement depends on the type of treatment applied.

Prior to statistical analysis, the assumptions required for parametric testing were verified. The normality test confirmed that all datasets were normally distributed, with p-values of 0.107, >0.150, and >0.150 for untreated, citric acid-treated, and NaOH-treated composites, respectively. In addition, the homogeneity of variance assumption was satisfied, as indicated by the equal variance test results, where the Multiple Comparisons and Levene's test produced p-values of 0.076 and 0.132, respectively. Since both normality and homogeneity requirements were met, the use of one-way ANOVA was appropriate and statistically valid.

The ANOVA results showed an F-value of 7.24 with a p-value of 0.005, indicating that there is a statistically significant difference in flexural bending strength among the composite groups. This confirms that the type of chemical treatment applied to the Agel fiber significantly influences the mechanical performance of the resulting composite. However, ANOVA alone does not identify which specific groups differ, so further analysis using Tukey pairwise comparison was conducted.

The Tukey test results revealed that the difference between untreated and citric acid-treated composites was not statistically significant ($p = 0.678$), despite the slight increase in mean strength. This suggests that, under the treatment conditions used in this study, citric acid modification did not produce a sufficiently strong improvement in interfacial bonding to significantly enhance flexural performance. In contrast, the comparison between untreated and NaOH-treated composites showed a significant difference ($p = 0.005$), indicating that NaOH treatment effectively improves bending strength. Similarly, the comparison between citric acid-treated and NaOH-treated composites also showed a significant difference ($p = 0.031$), confirming the superior performance of NaOH treatment over citric acid treatment.

From a materials engineering perspective, the superior performance of NaOH-treated composites can be attributed to the alkali treatment mechanism. NaOH removes surface impurities such as lignin, hemicellulose, and waxes, resulting in increased surface roughness and improved mechanical interlocking between fiber and matrix. This

leads to more efficient stress transfer under bending loads and ultimately higher flexural strength. On the other hand, although citric acid treatment is known to promote esterification and reduce fiber hydrophilicity, the results suggest that the extent of chemical modification achieved in this study was not sufficient to significantly enhance load transfer compared to the untreated condition.

Overall, the statistical and mechanical results consistently show that NaOH treatment is the most effective method among those investigated for improving the flexural bending strength of Agel fiber composites. While citric acid treatment offers a more environmentally friendly alternative, its effectiveness may depend strongly on process parameters such as concentration, curing conditions, and the presence of catalysts. Therefore, further optimization of citric acid treatment is recommended to fully realize its potential as a sustainable surface modification technique.

4. Conclusion

The results of this study show that chemical treatment significantly affects the flexural bending strength of Agel fiber-reinforced composites. The untreated composite exhibited a strength of 36.922 MPa, the citric acid-treated composite slightly increased to 37.784 MPa, and the NaOH-treated composite achieved the highest value of 40.611 MPa. Statistical analysis confirmed that the data met parametric assumptions and that there was a significant difference among groups (ANOVA, $F = 7.24$, $p = 0.005$). Tukey testing further indicated that NaOH-treated composites were significantly stronger than both untreated and citric acid-treated composites, while no significant difference was found between untreated and citric acid-treated samples. These findings demonstrate that NaOH treatment is more effective in improving flexural performance due to better fiber-matrix bonding, whereas citric acid treatment showed limited improvement under the conditions used, suggesting that further optimization is required for it to be competitive.

Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the Material Testing Laboratory of the Mechanical Engineering Department at Politeknik Negeri Bali for providing the facilities used in this research.

Reference

- [1] I. Elfaleh *et al.*, "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials," *Results in Engineering*, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101271.
- [2] B. Dev, A. Rahman, R. Alam, R. Repon, and Y. Nawab, "Mapping the progress in natural fiber reinforced composites: Preparation, mechanical properties, and applications," *Polymer Composites*, May 2023, doi: 10.1002/pc.27376.
- [3] D. Thapliyal *et al.*, "Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges," *Journal of Composites Science*, Dec. 2023, doi: 10.3390/jcs7120506.
- [4] A. Karimah *et al.*, "A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations," *Journal of Materials Research and Technology*, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.014.
- [5] T. Islam *et al.*, "Advancements and challenges in natural fiber-reinforced hybrid composites: A comprehensive review," *SPE Polymers*, Jun. 2024, doi: 10.1002/pls2.10145.
- [6] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, "A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications," *Polymer Composites*, Sep. 2021, doi: 10.1002/pc.26312.
- [7] M. Aravindh *et al.*, "A Review on the Effect of Various Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Renewable Fiber-Reinforced Composites," *Advances in Materials Science and Engineering*, Jan. 2022, doi: 10.1155/2022/2009691.
- [8] J. De and R. Baxi, "Experimental Investigation and Analysis of Mercerized and Citric Acid Surface Treated Bamboo Fiber Reinforced Composite," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 225, Aug. 2017, doi: 10.1088/1757-899x/225/1/012154.
- [9] M. Varma and S. Chandran, "Surface treatment of natural fibers for enhancing interfacial adhesion and mechanical properties in biocomposites - a comprehensive review," *Composite Interfaces*, vol. 32, pp. 1729–1765, Apr. 2025, doi: 10.1080/09276440.2025.2498795.
- [10] I. W. P. Y. Asana, R. N. Baiti, and K. W. Widantha, "The Effect of Reinforcement Surface Treatment With Citric Acid on The Flexural and Hardness Properties of Epoxy/Wood Sawdust Composites," *LOGIC*, vol. 25, no. 2, pp. 100–106, Jul. 2025, doi: 10.31940/logic.v25i2.100-106.
- [11] G. Ngurah, N. Santhiarsa, G. Bagus, W. Kusuma, I. Gede, and A. Negara, "Mechanical Characterization of NaOH-Treated Agel Fiber-Cotton Composites," *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST)*, Nov. 2023, doi: 10.17977/um016v7i22023p214.
- [12] H. Hestiawan, Jamasri., and Kusmono, "A Preliminary Study: Influence of Alkali Treatment on Physical and Mechanical Properties of Agel Leaf Fiber (Corypha gebanga)," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 842, pp. 61–66, Jun. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.842.61.
- [13] S. Majhi, S. Pradhan, V. Prakash, and S. Acharya, "Influence of alkali treatment on the interfacial shear strength of Agave lechuguilla fiber and its significance as a reinforcing material in polymer composites for mechanical applications," *Polymer Composites*, Mar. 2023, doi: 10.1002/pc.27336.
- [14] M. Nuryanta *et al.*, "The effect of stacking sequence on the properties of hybrid agel/glass fiber reinforced polymer composite laminates," presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Aug. 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1381/1/012014.
- [15] A. M. Del Campo, J. Robledo-Ortiz, M. Arellano, M. Rabelero, and A. Pérez-Fonseca, "Accelerated Weathering of Polylactic Acid/Agave Fiber

- Biocomposites and the Effect of Fiber–Matrix Adhesion,” *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 29, pp. 937–947, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01936-z.
- [16] S. Messaoui, K. E. Borchani, L. Ghali, N. Guermazi, N. Haddar, and S. Msahli, “Effect of a New Composition Ratio and of a New Chemical Treatment on Natural Alfa Fiber/polypropylene Composites Manufacturing and Their Mechanical Properties,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, pp. 10126–10141, Oct. 2021, doi: 10.1080/15440478.2021.1993485.
- [17] M. M. Hassan, N. Tucker, and M. J. Le Guen, “Thermal, mechanical and viscoelastic properties of citric acid-crosslinked starch/cellulose composite foams,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 230, p. 115675, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115675.
- [18] N. Kharchi *et al.*, “Citric acid treatment: A new approach to improving *Ampelodesma mauritanica* fibers-poly-lactic acid composites,” *Industrial Crops and Products*, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.120143.