

P.ISSN : 2502-2040
E.ISSN : 2581-0138

MACHINE

JURNAL TEKNIK MESIN

Vol. 11 No. 2 Oktober 2025

Jurnal
Teknik Mesin

Vol. 11

No. 2

Hal

Oktober 2025

P.ISSN : 2502-2040
E.ISSN : 2581-0138

TERKAREDITASI BERDASARKAN KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL PENGUATAN RISET DAN PENGEMBANGAN KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI REPUBLIK INDONESIA NO. NOMOR 21/E/KPT/2018 TENTANG PERINGKAT AKREDITASI JURNAL ILMIAH PERIODE I TAHUN 2018



Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Sains dan Teknik
Universitas Bangka Belitung

SUSUNAN DEWAN REDAKSI

Redaktur:

Saparin, S.T., M.Si.

Editor:

Firlya Rosa, S.ST., M.T.

Ir. Yudi Setiawan, S.T., M.Eng.

Ir. Suhdi, S.S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Rodiawan, S.T., M.Eng. Prac., Ph.D

Dr. Franto, S.T., M.Si.

Ir. Eka Sari Wijianti, S.Pd., M.T.

Adam Zuyyinal Adib, S.T., M.T.

Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T., Ph.D.

Abdul Gafur, S.Si., M.T.

Aris Sandi, S.ST., M.Eng.

Deri Teguh Santoso., S.T., M.T.

Dr. Ilham Ary Wahyudie., M.T.,

CHIQA

Mitra Bestari:

Dr. Dani Harmanto (University of Derby), Scopus
ID: 55159740800

Ts. Dr. Nur Rashid bin Mat Nuri (UTeM)
Scopus ID: 55203041500

Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, M.T.(Untirta)
Scopus ID: 57193687510
Sinta ID: 260315

Dr. Ir. Erwin Siahaan, M.Si. (Untar)
Scopus ID: 57199235178
Sinta ID: 5990421

Hadi Wahyudi, S.T., M.T., Ph.D. (Untirta)
Scopus ID: 55803690600
Sinta ID: 260203

Dr. Yanuar Burhanuddin, M.T. (Unila)
Scopus ID: 23391898600

Dr. Sukanto, S.ST., M.Eng.(Polman Babel)
Scopus ID: 57208470145

Dr. Ridho Irwansyah, S.T., M.T. (UI)
Scopus ID: 55006023800

Teguh Dwi Widodo, S.T., M.Eng., Ph.D. (UB)
Scopus ID: 56258446700

Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. (Unila)
Scopus ID: 57210989465

Rusdi Febriyanto, S.Pd., M. Eng. (Untirta)
Scopus ID: 57207777061

Sekretariat:

Nia Erawati, S.I.Pust.

Laman Jurnal:

<http://journal.ubb.ac.id/index.php/machine>

Alamat Redaksi:

Gedung Babel IV

Jurusan Teknik Mesin – Fakultas Sains dan Teknik
Kampus Terpadu Universitas Bangka Belitung
Balunijuk, Kabupaten Bangka Prov. Bangka Belitung

Laman : mesin.ubb.ac.id

Email : teknikmesinunivbabel@gmail.com

PENGANTAR EDITOR

Machine; Jurnal Teknik Mesin Universitas Bangka Belitung diterbitkan sebagai media untuk menampung tulisan-tulisan hasil dari penelitian dosen maupun mahasiswa di bidang Teknik Mesin.

Melalui jurnal ini, tim redaksi mengundang para peneliti di bidang teknik mesin untuk berpartisipasi secara aktif untuk mempublikasikan hasil penelitiannya.

Diharapkan tulisan-tulisan di jurnal ini dapat menjadi referensi bagi peneliti-peneliti di masa yang akan datang.

Tim Redaksi

Machine; Jurnal Teknik Mesin

DAFTAR ISI

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN KATALIS ZEOLIT TERHADAP KARAKTERISTIK BIO-OIL DARI PIROLISIS LIMBAH LDPE, BAN, BAMB	92
Yupi Eka Indriana ¹ , Farid Majedi ² , Indah Puspitasari ³	92
EVALUASI EFISIENSI KINERJA FURNACE F-03 PADA UNIT KILANG DI PUSAT PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA MINYAK DAN GAS BUMI CEPU	99
Diah Nur Fitri Midayoga ¹ , Nur Annisa ² , Erwan Adi Saputro ³ , Didiek Heru Wuryanto ⁴	99
EVALUASI TORSI ELECTRIC ENGINE PROTOTIPE PERAHU LISTRIK NELAYAN MENGGUNAKAN METODE PRONY BRAKE	106
Ahmad Ilham Ramadhani ^{1*} , Andie Murtono ²	106
ANALISIS BEBAN STATIS PADA BINGKAI PANEL SURYA YANG DAPAT BERFUNGSI SEBAGAI PENGGANTI ATAP BANGUNAN	113
Budiman ¹ , Rudi Irawan ² , Haris Rudianto ³	113
PENERAPAN <i>INTERNET OF THINGS</i> APLIKASI <i>BLYNK</i> PADA ALAT BANTU PRAKTIKUM FISIKA HUKUM HOOKE	119
Safira Adelia Putri ¹ , Dwi Arnoldi ² , Adian Aristia Anas ³ , Syamsul Rizal ⁴ , Ahmad Zamheri ⁵ , Ali Medi ⁶ , Rachmat Dwi Sampurno ⁷	119
INVESTIGATION OF DORSAL FIN EFFECTS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF INVERTED-V EMPENNAGE VTOL UNMANNED AERIAL VEHICLE	127
Muhammad Agung Bramantya ¹ , Gesang Nugroho ²	127
PEMBUATAN KOMPOSIT Matrik Resin Fenolik Diperkuat Serbuk Logam dan RHA Hibrid dengan Metode Metalurgi Serbuk	135
Ardiansyah ¹ , Sukanto ^{2*} , Erwanto ³ , Yudi Oktiadi ⁴	135
ANALISA LAJU PERPINDAHAN PANAS PADA MESIN PENGERING BIJI KOPI	143
M. Rakha Al Hakim ¹ , Fenoria Putri ² , Muhammad Irfan Dzaky ³	143
PERANCANGAN DAN PEMBUATAN TROLI KAPASITAS 240 KG GUNA MEMPERSINGKAT WAKTU PENCUCIAN, PELAPISAN, DAN DISTIBUSI <i>PART WEDGES TYPE D6</i> PADA PT. UMA	152
Oktavianus Ardhian Nugroho ^{1*} , Y.B. Adyapaka Apatya ² , Dimas Bagus Dwiyantoro ³ , Phillips Dede Kurniawan ⁴	152
DAMPAK KEBOCORAN RISER WALL TUBE TERHADAP PRODUKSI ENERGI DAN KERUGIAN KWH PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK: STUDI KASUS PLTU XYZ UNIT 1	162
Muhammad Facheruddin BJ ¹ , Muhammad Ikram Kido ¹ , Muhammad Zainuddin ¹ , Abdul Halim ¹ , M. Anis Ilahi Rahmadhani ¹ , Padhlani Qurrata A'yun ¹ , Mujahid Ikhlasul Amal ¹ , Ismail ¹ , A. Besse Riyani Indah ²	162
FILTER SYSTEM DESIGNED TO REDUCE THE EMISSION OF GASOLINE MOTORCYCLE POLLUTANTS	169
Yusvardi Yusuf ¹ , Muhammad Bayu Wardana ¹ , Ni Ketut Caturwati ¹ , Erny Listijorini ¹ , Dhimas Satria ¹ , Dwinanto Sukamto ¹ , Mekro Permana Pinem ¹	169

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN KATALIS ZEOLIT TERHADAP KARAKTERISTIK BIO-OIL DARI PIROLISIS LIMBAH LDPE, BAN, BAMBU

Yupi Eka Indriana¹, Farid Majedi², Indah Puspitasari³

¹ Program Studi Teknik Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Madiun

Jl. Ring Road Barat, Kec Manguharjo Kota Madiun, Jawa Timur 63162

farid@pnm.ac.id¹

Abstrak

Adanya permasalahan bahan bakar fosil yang semakin menipis, sampah di TPA Winongo, Madiun yang kapasitas berlebih. Dibutuhkan suatu energi alternatif (renewable), yang dapat dihasilkan adalah sampah sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil salah satunya pirolisis. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia bahan organik melalui pemanasan tanpa atau sedikit oksigen menghasilkan produk gas, cair (tar), dan arang. Zeolit alam digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis untuk mengubah rantai hidrokarbon pendek menjadi rantai hidrokarbon yang lebih panjang. Proses pirolisis menggunakan alat pirolisis dengan model rotary kiln dengan pemanas heater listrik. Proses penelitian ini menggunakan bahan baku total seberat 500 gram meliputi sampah plastik LDPE 50%, ban bekas 25%, dan bambu bekas 25% dengan variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi temperatur 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C dan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam dengan berat 83,3 gram di setiap sekat, dengan proses selama 3 jam. Pengambilan data volume bio-oil diambil setiap 3 menit sekali, massa jenis dan nilai kalor diteliti saat proses pirolisis sudah selesai. Hasil pengujian menunjukkan volume tertinggi bio-oil (tar) pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml, massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798 g/ml, dan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr.

Kata kunci : pirolisis, katalis zeolit, bio-oil (tar), karakteristik bio-oil (tar).

Abstract

The problem of dwindling fossil fuels, waste in Winongo landfill, Madiun which is excess capacity. An alternative energy (renewable) is needed, which can be produced from waste as an alternative fuel to replace fossil fuels, one of which is pyrolysis. Pyrolysis is the process of thermochemical decomposition of organic materials through heating without or little oxygen to produce gaseous, liquid (tar), and charcoal products. Natural zeolite is used as a catalyst in the pyrolysis process to convert short hydrocarbon chains into longer hydrocarbon chains. The pyrolysis process uses a pyrolysis device with a rotary kiln model with electric heater heating. This research process uses a total raw material weighing 500 grams including 50% LDPE plastic waste, 25% used tires, and 25% used bamboo with the variables used in this study are temperature variations of 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, and 600°C and the addition of 2 natural zeolite catalyst baffles weighing 83.3 grams in each baffle, with a process of 3 hours. Bio-oil volume data was taken every 3 minutes, density and calorific value were studied when the pyrolysis process was complete. The test results showed the highest volume of bio-oil (tar) at 400°C was 261 ml, the lowest density at 600°C was 0.798 g/ml, and the highest calorific value at 500°C was 54,233 Cal/gr.

Key words : pyrolysis, zeolite catalyst, bio-oil (tar), bio-oil (tar) characteristics.

PENDAHULUAN

Data statistik Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) cadangan minyak

Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel di tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel di tahun 2015. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengatakan minyak bumi di Indonesia akan habis dalam sembilan tahun kedepan bila tidak ditemukan cadangan bahan bakar yang baru.

Menurut L. Parinduri dan N. Parinduri [1], alasan kelangkaan ini adalah tingkat konsumsi bahan bakar yang sangat tinggi dan terus meningkat setiap tahunnya. Kondisi ini memperlihatkan urgensi dalam mencari solusi energi alternatif dan berinvestasi dalam sumber energi yang dapat diperbarui (*renewable*).

Permasalahan sampah menjadi sebuah topik yang signifikan untuk dibahas. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun merupakan salah satu tempat pembuangan akhir sampah yang mengalami masalah over kapasitas. Kota Madiun memproduksi lebih dari 100 ton sampah setiap harinya. TPA dengan luas 6,4 hektar tersebut sudah over kapasitas [2]. Oleh karena itu, pengelolaan sampah yang tepat sangat diperlukan untuk mengatasi permasalahan sampah yang terjadi di TPA Winongo, Madiun.

Untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, upaya berkelanjutan dilakukan untuk menemukan bahan bakar alternatif terbarukan (*renewable*) dan ramah lingkungan. Penggunaan bahan bakar alternatif menjadi sangat penting dan tidak dapat dihindari jika terjadi krisis energi. Salah satu energi alternatif yang dapat dihasilkan adalah sampah sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil melalui pirolisis [3].

Proses pirolisis dapat memecah hidrokarbon rantai karbon panjang menjadi rantai hidrokarbon berantai pendek. Untuk mempercepat pemecahan rantai hidrokarbon diperlukan suatu katalis. Katalis adalah zat yang mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut bereaksi. Katalis yang digunakan adalah katalis zeolit. Katalis zeolit adalah bahan yang memiliki struktur kristal silikat dan alumina dengan pori-pori yang teratur, yang mempengaruhi sifat katalitiknya. Zeolit mempunyai cukup banyak pori yaitu sekitar 30% lebih dari volumenya dan banyak bercampur dengan materi pengotor [4].

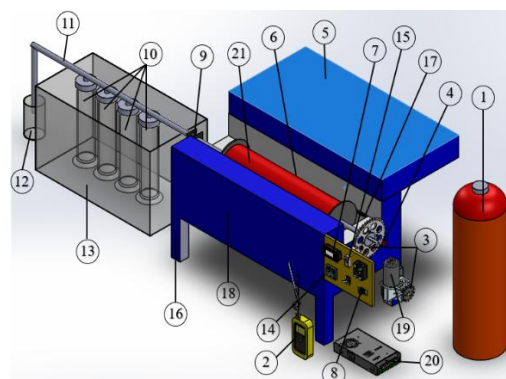
Dari permasalahan diatas dan penelitian sebelumnya dapat disimpulkan bahwa dengan menipisnya cadangan minyak yang ada di Indonesia maka perlu dilakukan penelitian mengenai bahan bakar alternatif (*renewable*), dan sampah-sampah yang ada di TPA Winongo yang semakin over kapasitas. Untuk mengatasi limbah plastik LDPE, ban, dan bambu yang ada di TPA Winongo dilakukan penelitian tentang pengaruh variasi temperatur terhadap volume dan massa jenis bio-oil (*tar*) dengan penambahan katalis zeolit alam sebagai pemecah rantai hidrokarbon yang lebih panjang. Dalam penelitian ini menggunakan 5 variasi temperatur sebesar 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C. Penelitian ini

bertujuan untuk memperoleh hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor *bio-oil (tar)* dari proses pirolisis disetiap variasi temperatur yang telah ditentukan. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah bahwa penambahan katalis zeolit alam akan meningkatkan volume, massa jenis, dan nilai kalor *bio-oil* sekaligus menurunkan kadar airnya [5].

METODE PENELITIAN

1. Alat

Alat yang digunakan untuk pirolisis adalah alat pirolisis dengan model *rotary kiln* dengan pemanas heater listrik. *Rotary kiln* merupakan model alat pirolisis yang menggunakan tabung diputar agar panas yang diberikan heater listrik dapat merata pada seluruh bagian tabung pirolisis, untuk alat pirolisis yang digunakan ini merupakan tugas akhir dari Dery Anton Daniswari dari Prodi Mesin Otomotif tahun 2021[6]. Pringgo Dista Fery Arianto, dkk dari Prodi Mesin Otomotif tahun 2022 [7] menambahkan flow meter untuk mengukur aliran gas yang lewat, menambahkan gas analyzer dan memperpanjang pipa output dari tabung pirolisis agar suhu yang terkandung dalam gas pada saat baru keluar dari tabung pirolisis tidak terlalu tinggi. Dalam penelitian ini, kami menambahkan sekat katalis (*catalyst bed*) di dalam tabung reaktor. Sekat katalis ini dimaksudkan untuk membatasi bercampurnya antara katalis dengan bahan baku dan mencegah penumpukan katalis zeolit alam di satu tempat. Penjelasan alat pirolisis ini bisa dilihat pada gambar 1 dan dibawah ini:



Gambar 1 Alat pirolisis dengan model rotary kiln

Keterangan:

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. Tabung nitrogen | 12. Gelas Ukur Akhir |
| 2. Thermocouple | 13. Akuarium |
| 3. Gear Ratio | 14. Electricity meter |
| 4. Bearing penyangga | 15. MCB |
| 5. Tutup Cover | 16. Meja Tabung |
| 6. Tabung Pirolisis | 17. Heater |
| 7. PID Controller | 18. Bata Ringan |
| 8. Dimmer | 19. Motor wiper |
| 9. Pemutus Putaran | 20. Power supply unit (PSU) |
| 10. Gelas Ukur 1, 2, 3, dan 4 | 21. Catalyst bed (sekat katalis) |
| 11. Selang | |

2. Bahan

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah sampah plastik LDPE, ban bekas, dan bambu bekas yang diperoleh dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang berada di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun.

3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian pirolisis meliputi persiapan sebelum melakukan proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek yaitu:

1. Pengumpulan bahan baku
Sampah plastik LDPE, ban bekas, dan besek bekas ikan yang digunakan diperoleh dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang berada di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun.
2. Pembersihan sampah
Langkah ini dilakukan untuk membersihkan limbah plastik LDPE, ban, dan besek untuk menghilangkan kotoran, debu, dan kontaminan lainnya yang dapat mempengaruhi kualitas produk pirolisis. Penggunaan bahan baku yang bersih dan bebas dari kontaminan juga dapat meningkatkan efisiensi proses pirolisis dan menghasilkan produk pirolisis yang lebih berkualitas.
3. Pengeringan sampah
Sampah plastik LDPE, ban bekas, dan besek bekas ikan yang sudah dibersihkan dan dipisahkan kemudian dilakukan pengeringan di bawah terik matahari. Panaskan besek bekas di oven pada suhu 110°C selama 30 menit, hingga tidak ada lagi embun yang muncul pada kaca oven. Proses pengeringan ini bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam bahan baku sebelum dilakukan proses pirolisis. Pengeringan bahan baku dapat membantu mempersiapkan bahan baku yang lebih baik untuk proses pirolisis, sehingga mengurangi kandungan air terhadap *bio-oil* hasil pirolisis.
4. Penimbangan sampah
Setelah limbah plastik LDPE, ban, dan besek dijemur dan benar benar kering, lalu campur semua bahan baku dengan komposisi sampah plastik LDPE 50%, ban bekas 25%, dan bekas besek 25% timbang dan bungkus bahan baku dengan ukuran setiap bahan 500 gr untuk setiap proses.

5. Modifikasi dan persiapan alat pirolisis
Pada penelitian ini dilakukan modifikasi alat dengan ditambahkan 2 sekat katalis (*catalyst bed*) yang digunakan sebagai tempat katalis dan pemisah katalis dengan bahan baku. Melakukan perbaikan pada tungku pirolisis dengan menambal bata ringan yang retak. Mengganti dinamo *wiper* dengan tipe yang sama dikarenakan dinamo wiper yang lama gear nya sudah aus dan mengganti beberapa kabel pada instalasi listrik untuk keamanan. Untuk menyiapkan seluruh perlengkapan alat pirolisis, dapat dilakukan dengan merangkai seluruh rangkaian alat pirolisis. Pastikan *heater* tidak terputus agar panas *heater* dapat maksimal, pastikan dalam tabung kondisi bersih sebelum dilakukannya proses pirolisis dan pastikan rangkaian pipa tidak tersumbat.
6. Pengecekan rangkaian pirolisis
Setelah alat disiapkan lalu cek apakah ada sambungan kelistrikan yang putus dan cek setiap bagian alat agar tidak terjadi kebocoran.
7. Aktivasi katalis zeolit alam
Aktivasi secara fisika katalis zeolit alam dilakukan dengan cara membuat ukuran batu zeolit memiliki ukuran yang sama, setelah itu dikalsinasi (pemanasan) pada suhu 300°C selama 2 jam menggunakan alat pirolisis.
8. Prosedur proses pirolisis
 - a. Setelah alat siap digunakan, kemudian siapkan batu zeolit masukkan ke dalam tabung pirolisis untuk selanjutnya dilakukan kalsinasi pada temperatur 300°C selama 2 jam.
 - b. Siapkan bahan baku dengan berat 500 gr untuk satu kali proses pirolisis.
 - c. Apabila bahan baku sudah siap dan sesuai dengan berat yang ditentukan lalu masukkan bahan ke dalam tabung pirolisis.
 - d. Masukkan katalis zeolit alam ke dalam tabung reaktor dengan berat 83,3 gram pada setiap lapisannya. Gunakan dua lapis katalis zeolit alam pada setiap satu kali proses pirolisis.
 - e. Setelah bahan dimasukkan, pasang tabung ke tungku dan pasang pipa-pipa penghubung. Selanjutnya kran tabung N_2 dibuka untuk memasukkan gas N_2 ke dalam alat pirolisis sampai keluar bau N_2 yang tercium pada pipa akhir. Proses ini sangat penting dilakukan karena untuk mendorong keluar O_2 yang ada dalam alat agar pirolisis dalam bekerja dengan maksimal dan berhasil.
 - f. Atur temperatur, untuk variasi pertama dilakukan pada temperatur 250°C ulangi langkah diatas sampai pada variasi temperatur 600°C. Jika sudah diatur lalu nyalakan alatnya.
 - g. Proses pirolisis dilakukan maksimal selama 3 jam ataupun sampai tidak keluar lagi asapnya pada pipa akhir, pada proses ini data diambil setiap 3 menit sekali.
 - h. Ulangi prosedur pirolisis dengan variasi temperatur pemanasan pirolisis selanjutnya, yaitu pada temperatur 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C dan pada setiap suhu pirolisis, pengambilan sampel dilakukan sebanyak 2 kali

untuk memastikan validitas data yang dihasilkan.

Metode pengamatan, pengukuran, dan pengujian proses pirolisis pada penelitian ini adalah pengamatan dan pengukuran volume bio-oil (tar) dilakukan setiap 3 menit dengan 5 variasi temperatur selama 3 jam, menguji hasil pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan variasi temperatur terhadap nilai kalor dengan menggunakan alat *Oxygen Bomb Calorimeter* LBC-C21, sesuai standar Internasional ASTM D5865-13 “Metode Uji Panas Batubara”, ASTM D240-17 “Metode Uji Nilai Kalor Minyak Bumi”, dan ASTM D4809-13 “*Oxygen Bomb Calorimeter*”. Mengukur massa jenis bio-oil (tar) pada berbagai suhu dilakukan dengan timbangan digital yang memiliki ketelitian 0,01 gram, menggunakan 5 ml bio-oil (tar) per sampel. Penghitungan menggunakan persamaan di mana ρ (rho) adalah massa jenis bio-oil (tar) (kg/m^3), m adalah massa bio-oil (tar) (kg), dan V adalah volume bio-oil (tar) (m^3).

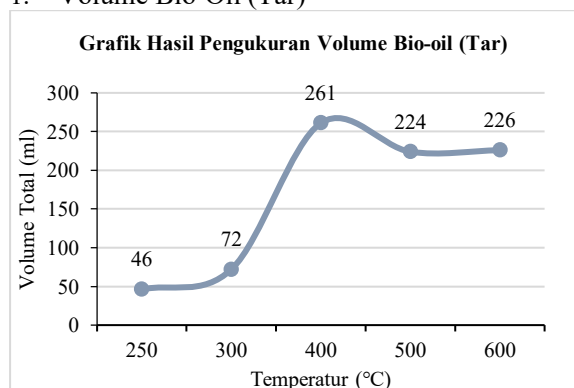
$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(1)$$

Setelah mendapatkan data volume bio-oil (tar), akan dilakukan pengujian massa jenis, dan nilai kalor di Laboratorium Bahan Bakar Kampus 2 Politeknik Negeri Madiun dan selanjutnya data akan diolah dan dilakukan analisis data yang dikumpulkan untuk menarik kesimpulan dan menjawab pertanyaan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini meliputi pengukuran volume bio-oil (tar), pengukuran nilai kalor bio-oil (tar) dan massa jenis bio-oil (tar) dari proses pirolisis pada berbagai temperatur. Berikut hasil penelitian bio-oil (tar) pirolisis yang telah dilakukan:

1. Volume Bio-Oil (Tar)

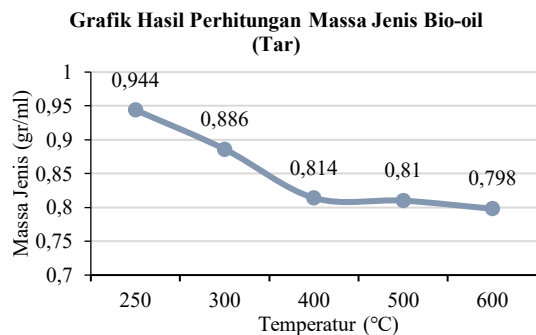


Gambar 2. Grafik Volume Bio-oil (Tar)

Gambar 2. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volume bio-oil (tar). Hasil bio-oil (tar) tertinggi pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml. Pada saat proses pirolisis gas yang keluar lebih sedikit daripada tidak menggunakan katalis. Hal ini juga dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis termasuk membantu mempercepat reaksi, memperpendek waktu reaksi, katalis mampu memutus rantai polimer lebih cepat [4]. Hasil bio-oil (tar) terendah pada temperatur 250°C sebanyak 46 ml. Hal ini disebabkan karena temperatur yang lebih rendah tidak cukup untuk memecah molekul-molekul besar dalam limbah plastik LDPE, ban, dan besek secara efektif, sehingga proses pirolisis tidak berlangsung secara optimal dan menghasilkan volume bio-oil yang lebih sedikit. Menurut Munarwan [8] pada temperatur 250°C menghasilkan volume bio-oil (tar) paling sedikit karena hanya energi ikatan terkecil (C-C) yang terputus sehingga gas dan tar yang terbentuk sedikit. Pada temperatur 500°C dan 600°C mengalami penurunan perolehan bio-oil (tar) dikarenakan temperatur tinggi juga mempengaruhi berkurangnya produk cair dan lebih banyak keluar produk gas. Rantai panjang molekul organik dan hidrokarbon mengalami perengkahan sekunder, yang memecahnya menjadi rantai yang lebih pendek sehingga tidak dapat terkondensasi [9]. Penelitian yang dilakukan Sabithah dkk [10] produk bio-oil (tar) yang dihasilkan setelah didiamkan 24 jam plastik HDPE 3 kg dan campuran plastik HDPE 2 kg dengan PET 1 kg membentuk lilin. Bio-oil (tar) yang dihasilkan pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C pada penelitian ini juga membentuk lilin.

2. Hasil Pengujian Bio-oil (Tar) Terhadap Massa Jenis

Gambar grafik hasil massa jenis bio-oil (tar) menggunakan limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan alat pirolisis rotary kiln pada suhu 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C, dengan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam sebanyak 83,3 gram pada setiap sekat selama 3 jam dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut:



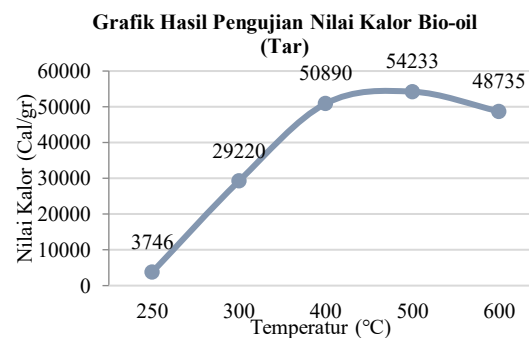
Gambar 3. Grafik Massa Jenis Bio-oil (Tar)

Gambar 3. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh terhadap massa jenis bio-oil (tar). Massa jenis tertinggi pada temperatur 250°C sebesar 0,944 gr/ml. Sedangkan massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798 gr/ml.

Semakin rendah nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan minyak lebih banyak daripada air, sebaliknya jika semakin tinggi nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan air yang lebih banyak. Karena massa jenis minyak lebih rendah daripada massa jenis air. Massa jenis bio-oil (tar) rendah ini dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis menyerap dan menyaring gas dan air sesuai jumlah pori-pori dari zeolit yang terbentuk jika zeolit dipanaskan [4]. Penelitian yang dilakukan Ibadurrohim [11] proses pirolisis tanpa menggunakan katalis memperoleh massa jenis lebih tinggi yaitu pada temperatur 300°C sebesar 1 gr/ml, sedangkan pada temperatur 600°C sebesar 0,91 gr/ml. Menurut [12] nilai densitas dari bahan bakar solar adalah 0,82-0,87 gr/ml, pada penelitian ini *bio-oil (tar)* pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C sudah memenuhi standar densitas solar.

3. Hasil Pengujian Bio-oil (Tar) Terhadap Nilai Kalor

Gambar grafik nilai kalor bio-oil (tar) menggunakan limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan alat pirolisis rotary kiln pada suhu 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C, dengan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam sebanyak 83,3 gram pada setiap sekat selama 3 jam dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut:



Gambar 4. Grafik Nilai Kalor Bio-oil (Tar)

Gambar 4. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh terhadap nilai kalor bio-oil (tar). Nilai kalor terendah pada temperatur 250°C sebesar 3.746 Cal/gr. Sedangkan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr. Pada temperatur 600°C mengalami penurunan nilai kalor, sebesar 54.233 Cal/gr. Semakin tinggi nilai kalor bio-oil (tar) ini dipengaruhi oleh semakin sedikit kandungan air. Penelitian yang dilakukan Ibadurrohim [11] proses pirolisis tanpa menggunakan katalis memperoleh nilai kalor lebih rendah yaitu pada temperatur 300°C sebesar 11590.71369 Cal/gr, sedangkan pada temperatur 600°C sebesar 14211.330872 Cal/gr. Menurut Sani dkk [12] solar memiliki nilai kalor sebesar 8.426,5 J/gr, pada penelitian ini bio-oil (tar) pada temperatur 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C sudah lebih tinggi dari standar nilai kalor solar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya temperatur pada proses pirolisis serta penambahan katalis zeolit alam akan sangat berpengaruh terhadap hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor bio-oil (tar) yang dihasilkan. Volume terendah bio-oil (tar) terdapat pada temperatur 250°C sebanyak 46 ml, sedangkan volume tertinggi bio-oil (tar) terdapat pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml. Semakin bertambah temperatur perolehan volume bio-oil (tar) semakin meningkat. Tetapi, pada temperatur 500°C dan 600°C mengalami penurunan perolehan bio-oil (tar) karena temperatur tinggi juga mempengaruhi berkurangnya produk cair dan lebih banyak keluar produk gas. Pada proses pengujian massa jenis bio-oil (tar) tertinggi pada temperatur 250°C sebesar 0,944 gr/ml, sedangkan massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798

gr/ml. Massa jenis bio-oil (tar) semakin tinggi temperatur semakin rendah nilai massa jenis, dikarenakan memiliki kandungan minyak lebih banyak dari pada air, sebaliknya jika semakin tinggi nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan air yang lebih banyak. Pada proses pengujian nilai kalor bio-oil (tar) terendah pada temperatur 250°C sebesar 3.746 Cal/gr, sedangkan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr. Pada nilai kalor semakin meningkat temperatur semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai kalor bio-oil (tar) ini dipengaruhi oleh semakin sedikit kandungan air. Hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor bio-oil (tar) juga dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis termasuk membantu mempercepat reaksi, memperpendek waktu reaksi, katalis mampu memutus rantai polimer lebih cepat. Katalis juga menyerap dan menyaring gas dan air sesuai jumlah pori-pori dari zeolit yang terbentuk jika zeolit dipanaskan. 453,56 MPa dan variasi arus 250 A sebesar 445,71 MPa sehingga kekuatan tarik melebihi nilai kekuatan tarik logam induk (*base metal*) terlemah *Grade A* sesuai *ASME Section IX*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Madiun dan pihak-pihak terkait yang telah membantu kelancaran proses penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Parinduri and T. Parinduri, "Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *J. Electr. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 88–92, 2020, [Online]. Available: <https://www.dosenpendidikan>.
- [2] S. A. C. Sakti, H. [tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah](https://surabaya.tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah). Artikel ini telah tayang di Surya.co.id dengan judul TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah, and P. S. A. C. S. | E. T. J. Permata, "TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah Artikel ini telah tayang di Surya.co.id dengan judul TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah,

<https://surabaya.tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah>, *Surya.co.id*, Kota Madiun, p. 1, 2021. [Online]. Available: <https://surabaya.tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah>.

- [3] F. Majedi, A. C. Arifin, B. Asngali, and H. Wahyu Barkhawa, "Tar Kinetic Parameters of Pyrolysis Processes of Brem, Plastic, and Durian Skin Waste with Temperature Variations on A Rotary Kiln," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012001.
- [4] Yudi Kenang Pamungkas, "Pengaruh Katalis Zeolit Alam Terhadap Perolehan," Universitas Jember, 2020.
- [5] Z. Magyarová, M. Králik, and T. Soták, "Utilization of zeolite catalysts in biomass exploitation: a minireview," *Monatshefte für Chemie - Chem. Mon.*, vol. 154, no. 8, pp. 815–835, 2023, doi: 10.1007/s00706-023-03099-8.
- [6] D. A. DANISWARI, "RANCANG BANGUN PENGEMBANGAN ALAT PROSES PIROLISIS DENGAN MODEL ROTARY KILN MENGGUNAKAN HEATER LISTRIK," Politeknik Negeri Madiun, 2021.
- [7] P. D. F. ARIANTO, "PENGARUH VARIASI HEATING RATE PIROLISIS TERHADAP NILAI KALOR DAN VOLUME BIO-OIL (TAR) HASIL PIROLISIS LIMBAH BREM DENGAN MODEL ROTARY KILN MENGGUNAKAN HEATER LISTRIK," Politeknik Negeri Madiun, 2022.
- [8] E. Munarwan and F. Majedi, "Karakteristik Bio-Oil Hasil Pirolisis Limbah Brem Dengan Variasi Temperatur," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 7, no. 1, pp. 23–28, 2019, doi: 10.32487/jtt.v7i1.552.
- [9] S. Jamilatun, Y. Elisthatiana, S. N. Aini, I. Mufandi, and A. Budiman, "Effect of Temperature on Yield Product and Characteristics of Bio-oil From Pyrolysis of *Spirulina platensis* Residue," *Elkawanie*, vol. 6, no. 1, p. 96, 2020, doi: 10.22373/ekw.v6i1.6323.
- [10] A. Sabitah, I. N. Ardiyat, Misbachudin, I. U. Wusko, Rahma, and P. Ningsih, "Waste : the Effect of Temperature and Reaction Time in,"

vol. 9, no. 1, pp. 98–106, 2024, doi:
10.20527/sjmekinematika.v9i1.318.

Dengan Model Rotary Kiln Menggunakan
Heater Listrik,” madiun state polytechnic, 2021.

[11] M. Ibadurrochim and politeknik negeri Madiun,
“Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap
Volume, Massa Jenis Dan Nilai Kalor Bio-Oil
(Tar) Hasil Pirolisis Limbah Sampah Plastik

[12] A. Anwar Sani, M. Ade Ariasya, and P. Negeri
Sriwijaya Jln Srijaya Negara Bukit Besar
Palembang, “Proses Pengolahan Limbah B3
(Oli Bekas) Menjadi,” *J. Austenit*, vol. 12, no.
2, pp. 48–53, 2020.

EVALUASI EFISIENSI KINERJA FURNACE F-03 PADA UNIT KILANG DI PUSAT PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA MINYAK DAN GAS BUMI CEPU

Diah Nur Fitri Midayoga¹, Nur Annisa², Erwan Adi Saputro³, Didiek Heru Wuryanto⁴

¹ Program Studi Teknik kimia, Teknik, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Jl. Rungkut Madya, Gn. Anyar, kec. Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur

Erwanadi.tk@upnjatim.ac.id¹

ABSTRAK

Industri minyak dan gas bumi memiliki peran penting untuk memenuhi kebutuhan energi nasional. *Furnace* merupakan alat utama yang berfungsi meningkatkan suhu *crude oil*. Di PPSDM Migas Cepu tersedia enam unit *furnace*, namun saat ini hanya dua yang beroperasi, yakni *Furnace-02* dan *Furnace-03*. Kedua unit tersebut termasuk tipe *box furnace* dengan sistem pembakaran horizontal. Bahan bakar yang digunakan adalah *fuel oil* serta gas, dan fungsinya adalah memanaskan *crude oil* hingga mencapai titik didih sebelum dialirkan menuju evaporator. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi *Furnace F-03* di PPSDM Migas Cepu melalui perhitungan neraca panas dan analisis kinerja operasional. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah *Furnace F-03* masih layak dioperasikan atau tidak, serta untuk mengidentifikasi potensi perbaikan yang dapat dilakukan guna meningkatkan efisiensi *furnace*, seperti optimalisasi sistem pembakaran, pemeliharaan rutin, dan pengurangan kebocoran panas. Evaluasi efisiensi dilakukan dengan menganalisis neraca panas *furnace*, menghitung efisiensi termal, dan membandingkan hasilnya dengan standar kelayakan. Hasil analisis menunjukkan efisiensi *Furnace F-03* sebesar 85,70%, yang masih berada dalam rentang kelayakan operasi. Namun, terdapat potensi peningkatan efisiensi dengan optimalisasi sistem pembakaran dan pengurangan kebocoran panas. Temuan ini dapat menjadi rujukan untuk peningkatan efisiensi *furnace* di kilang lainnya.

Kata kunci : *furnace, neraca panas, efisiensi termal.*

ABSTRACT

The oil and gas industry plays a crucial role in meeting national energy demands. A furnace is an essential unit used to increase the temperature of crude oil in an oil and gas refinery. At the Human Resources Development Center for Oil and Gas (PPSDM Migas) in Cepu, there are six furnaces available, but only two are currently in operation, namely Furnace 2 and Furnace 3. These operating furnaces are of the box furnace type with a horizontal firing system. Both furnaces utilize fuel oil and gas as fuel sources and function to raise the crude oil temperature to its boiling point before entering the evaporator. This study aims to evaluate the efficiency of Furnace F-03 at PPSDM Migas Cepu through heat balance calculations and operational performance analysis. The evaluation seeks to determine whether Furnace F-03 remains feasible for operation and to identify potential improvements that could enhance furnace efficiency, such as optimizing the combustion system, performing routine maintenance, and reducing heat losses. The efficiency evaluation was carried out by analyzing the furnace heat balance, calculating thermal efficiency, and comparing the results with operational feasibility standards. The results of the analysis indicate that Furnace F-03 has an efficiency of 85.70%, which is still within the operational feasibility range. However, there is potential for efficiency improvement through combustion system optimization and heat loss reduction. These findings can serve as a reference for improving furnace efficiency in other refineries.

Kata kunci : *furnace, heat balance, thermal efficiency.*

PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi merupakan sektor strategis yang berperan penting dalam

mendukung kebutuhan energi nasional. Minyak mentah (*crude oil*) menjadi bahan baku utama yang diproses untuk menghasilkan berbagai produk turunan bernilai ekonomis, seperti bensin, solar, aspal, residu, dan lainnya. *Crude oil* memiliki

komposisi kimia yang kompleks dan bervariasi, bergantung pada sumber dan kualitas minyak mentah tersebut. Untuk memisahkan berbagai komponennya menjadi fraksi-fraksi tertentu yang bermanfaat. Proses pengolahan minyak mentah di kilang memanfaatkan peralatan utama seperti *heat exchanger*, *furnace*, dan unit distilasi.

Furnace adalah komponen penting dalam proses pemanasan awal *crude oil* sebelum memasuki tahap distilasi[4]. Pemanasan ini bertujuan untuk meningkatkan temperatur minyak hingga mencapai titik didih yang diinginkan, sehingga komponen-komponen dalam minyak mentah dapat dipisahkan sesuai dengan fraksi titik didihnya. Di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi Cepu (PPSDM Migas Cepu), terdapat enam unit *furnace*, namun hanya dua unit yang beroperasi aktif, yaitu *Furnace F-02* dan *Furnace F-03*. Kedua *furnace* ini merupakan jenis *box furnace* dengan sistem pembakaran horizontal, yang menggunakan bahan bakar solar dan gas. Seiring waktu, efisiensi *furnace* cenderung mengalami penurunan. Penurunan efisiensi disebabkan oleh berbagai faktor, seperti usia alat, intensitas penggunaan, dan pemeliharaan yang tidak optimal[6]. Hal tersebut dapat memengaruhi kemampuan *furnace* dalam mentransfer panas sehingga penurunan efisiensi dapat mengakibatkan adanya peningkatan konsumsi bahan bakar dan menurunkan produktivitas kilang. Oleh karena itu, evaluasi efisiensi *furnace* menjadi langkah penting untuk memastikan alat tetap berfungsi secara optimal, efisien, dan hemat energi [3],[11]. Penelitian ini berfokus pada *Furnace F-03* sebagai proses pengolahan minyak mentah di PPSDM Migas Cepu bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi *Furnace F-03* melalui perhitungan neraca panas dan analisis kinerja operasional. Metode evaluasi melibatkan pengumpulan data operasional, seperti suhu dan tekanan masuk-keluar minyak mentah, serta perhitungan panas yang masuk dan keluar dari *furnace*. Dari hasil evaluasi dapat diketahui kelayakan dari *furnace 01* yang terdapat di PPSDM Migas Cepu. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi perbaikan dan langkah-langkah untuk meningkatkan efisiensi *furnace*, seperti optimalisasi sistem pembakaran, pemeliharaan rutin, dan pengurangan kebocoran panas. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan manfaat bagi PPSDM Migas Cepu, tetapi juga dapat menjadi referensi untuk peningkatan efisiensi operasional *furnace* di industri migas lainnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan dengan mengambil dan mengolah data real time di lapangan serta studi literatur[1],[2],[5],[6],[10] kemudian dilakukan analisis data selama lima hari mulai tanggal 6-10 November 2024.

Tabel 1 Data Temperature *Furnace*

Tanggal	T in CO (°C)	T out CO (°C)	T in FG (°C)	T Wall (°C)	T FO in (°C)	T Stack (°C)
11/06/24	270,8	328,8	66,6	630	45	230,5
11/07/24	278,8	324,7	66,6	639	69,4	284,4
11/08/24	261,5	325,9	66,6	584	48,4	293,7
11/09/24	229,7	321,7	66,6	642	45,8	282,7
11/10/24	264,6	331	66,6	646	44,3	298,2
Rata-Rata	261,08	326,42	66,6	628,2	50,58	277,9

Tabel 2 Tekanan alir minyak mentah dan bahan bakar minyak

Tanggal	P in Crude Oil (kg/cm ²)	P out Crude Oil (kg/cm ²)	P in Fuel Oil (kg/cm ²)
11/06/24	3	0,4	4,9
11/07/24	2,1	0,42	5,21
11/08/24	2,4	0,39	5,68
11/09/24	2,6	0,38	5,71
11/10/24	2,6	0,42	6
Rata-Rata	2,425	0,402	5,5

Tabel 3 Laju Alir *Crude Oil* Dan *Fuel Oil*

Tanggal	Cap. CO (m ³ /hari)	Cap. FO (m ³ /hari)	Cap. CO (m ³ /jam)	Cap. FO (m ³ /jam)
11/06/24	291,544	298,87	12,149	12,454
11/07/24	266,058	310,44	11,087	12,936
11/08/24	299,343	283,37	12,474	11,808
11/09/24	295,423	284,67	12,310	11,862
11/10/24	301,8	285,27	12,576	11,887
Rata-Rata	290,8336	292,52	12,119	12,189

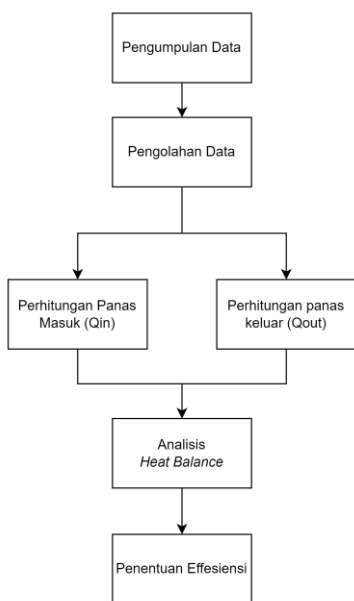
Tabel 4 Data Massa Jenis *Crude Oil* dan *Fuel Oil*

Tanggal	Crude Oil (kg/m ³)	Fuel Oil (kg/m ³)
11/06/24	0,8428	0,88
11/07/24	0,8401	0,88
11/08/24	0,8399	0,88
11/09/24	0,84	0,88

Tanggal	Crude Oil (kg/m ³)	Fuel Oil (kg/m ³)
11/10/24	0,8386	0,88
Rata-Rata	0,84	0,88

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode analitik numerik dalam menganalisis keseimbangan panas (*heat balance*) pada *furnace*. Metode ini dilakukan dengan menggabungkan data hasil pengamatan lapangan secara real time dan data sekunder dari literatur [1], [2], [5], [6], [10] sebagai dasar analisis. Data pada Tabel 1–4 digunakan sebagai dasar dalam melakukan analisis *heat balance* pada *furnace*. Pendekatan analitik numerik diterapkan untuk menghitung besaran energi masuk (*Q-in*) dan energi keluar (*Q-out*) melalui perhitungan termodinamika dan persamaan neraca energi.

Prosedur lengkap perhitungan dan alur pengolahan data ditunjukkan pada diagram alir proses analisis *heat balance* pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Analisis *Heat Balance*

Diagram alir pada Gambar 1 menunjukkan tahapan utama dalam proses analisis *heat balance* pada *furnace*. Proses dimulai dengan pengumpulan data lapangan yang meliputi suhu umpan, suhu bahan bakar, laju alir *fuel oil*, udara pembakaran, serta parameter operasional lainnya. Data tersebut kemudian diolah dan dikonversi ke satuan yang seragam, seperti massa (lb/jam) dan energi (Btu/jam), disertai penentuan nilai kalor jenis (*C_p*) dan nilai kalor bawah (LHV). Selanjutnya dilakukan perhitungan total panas masuk (*Q_{in}*), yang mencakup energi dari bahan bakar, udara pembakaran, *atomizing steam*, dan *fluida* umpan,

serta perhitungan total panas keluar (*Q_{out}*) yang meliputi panas yang diserap oleh *crude oil*, gas buang, dan kehilangan panas dinding *furnace*. Hasil kedua perhitungan tersebut digunakan untuk menentukan efisiensi termal sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Panas Masuk

1. Menentukan total *Flue Gas* terpakai

Berdasarkan Literatur *Furnace Operation* [7], jumlah *flue gas* dihitung menggunakan persamaan “Robert D. Read”

$$W_s = 443,35 \frac{T_s}{P_s} \times d^{2,667} \times \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L \times SG \times T}} \dots\dots\dots(1)$$

$$= 89,951 \text{ lb/jam.}$$

2. Menentukan Nilai Bakar *Fuel Oil*

$$SG_{60/60} = 0,8805$$

$$^0API = 29,21$$

$$T_{fuel\ oil\ in} = 123,044 \text{ } ^\circ F$$

$$T_{basis} = 60^\circ F$$

Penentuan kadar hidrogen pada *fuel oil* dilakukan dengan menggunakan Persamaan 9-8, dengan asumsi *fuel oil* tidak mengandung sulfur [8]

$$H = 26 - 15 S \dots\dots\dots(2)$$

$$\%Wt\ Hidrogen = 26 - 15 (0,8805) = 12,7925$$

$$\%Carbon = 100 - \% Wt\ Hidrogen$$

$$= 100 - 12,7925 = 87,2075$$

Berdasarkan *figure 5-23* W.L. Nelson, didapatkan harga *K* = 11,4

Berdasarkan *figure 5-22*[7], *Gross Heating Value* (GHV) = 19050 Btu/lb.

3. Menentukan Lower Heating Value (LHV) *Fuel Oil*

$$Q_L = Q_H - 92,7 H \dots\dots\dots(3)$$

$$= 19250 - 92,7 (12,7925)$$

$$= 18064,14 \text{ Btu/lb}$$

4. Menentukan kalor yang dibakar pada *Fuel Oil* (*Q₁*)

$$Q_1 = \text{kebutuhan } fuel\ oil \times LHV\ Fuel\ Oil \dots\dots(4)$$

$$=23665,75 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 18064,14 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

$$=427501319,2 \text{ Btu/jam}$$

5. Menentukan Kalor Sensibel Fuel Oil (Q2)

$$Q2 = \text{kebutuhan FO} \times \text{CP FO} \times (T2-T1) \dots(5)$$

$$=23665,75 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,4525 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (123,044-77)^\circ\text{F}$$

$$=493073,78 \text{ Btu/jam}$$

6. Menentukan Kalor Yang terbawa Umpan (Q3)

$$Q3 = m \times Cp \times \Delta T \dots\dots\dots(6)$$

$$=22348,19 \frac{\text{lb}}{\text{jam}} \times 0,57 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (501,9-60)^\circ\text{F}$$

$$=5613889,33 \text{ Btu/jam}$$

7. Menentukan Kalor Pembakaran Flue Gas (Q4)

$$Q4 = \text{kebutuhan flue gas} \times \text{LHV flue gas} \dots(7)$$

$$=1396,72 \frac{\text{cuft}}{\text{jam}} \times 18064,14 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

$$=25230467,42 \text{ Btu/jam}$$

8. Menentukan Kalor Sensibel Flue Gas (Q5)

Panas spesifik setiap komponen dapat dicari dengan bantuan figure 3 dan figure 5 dari literatur Kern, D. Q. 1983 "Process Heat Transfer" Panas sensibel flue gas (Q5) = 2690,1 Btu/jam.

9. Menentukan kalor Automizing Steam (Q6)

$$Q6 = M \text{ steam} \times \text{Entalpi rata-rata} \dots\dots\dots(8)$$

$$=8399,14 \times 1081,9$$

$$=9087033,46 \text{ Btu/Jam}$$

10. Menentukan Kalor Udara Pembakaran (Q7)

Diketahui Cp udara (60°F) = 0,2004 kkal/kg°C (Hilsenthrath, 1965)

$$Q7 = \text{kebutuhan udara pembakaran}$$

$$\times \text{CP udara} \times (T \text{ actual} - T_{\text{basis}}) \dots\dots\dots(9)$$

$$Q7 = 265366,433 \frac{\text{Kg}}{\text{jam}} \times 0,2402 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times$$

$$(32^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) \times 3,968 \frac{\text{Btu}}{\text{kkal}}$$

$$=8093579,389 \text{ Btu/jam}$$

11. Panas Sensibel Air Karena Kelembaban Udara (Q8)

$$Q8 = (WA \times Ma) \times Cp \text{ air} \times (T_{\text{aktual}} - T_{\text{basis}}) \dots(10)$$

$$Q8 = (1708,2 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 0,027) \times 1 \frac{\text{kkal}}{\text{kg}} \times C \times$$

$$(32^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) \times 3,968 \frac{\text{Btu}}{\text{kkal}}$$

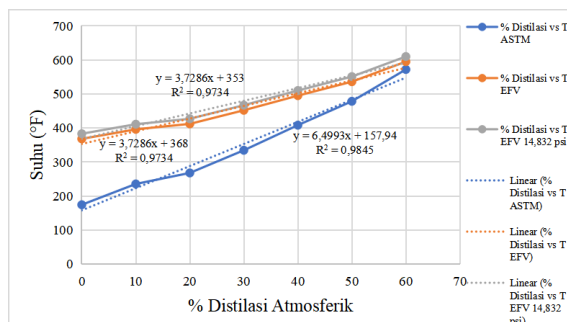
$$=5855,697 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

12. Total Panas Masuk (Qin)

$$Q_{\text{in}} = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5 + Q6 + Q7 + Q8 \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_{\text{in}} = (427501319,2 + 493073,78 + 5613889,33 + 25230467,42 + 2690,1 + 9087033,46 + 8093579,389 + 5855,697) \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

$$=47,358,500,643 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$



Gambar 2 Grafik Hubungan % Distilasi vs ASTM dan T EFV

Berdasarkan grafik, perpotongan antara kurva T ASTM dan T EFV menunjukkan kondisi campuran pada suhu 450 °F. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam penentuan titik didih minyak mentah pada kondisi standar [7] mengacu pada Gambar 5.27 Nelson pada tekanan 14,7 psi dan suhu 600 °F, sehingga diperoleh nilai T boiling sebesar 590 °F. Setelah titik didih standar ditetapkan, langkah selanjutnya adalah menghitung titik didih pada kondisi operasi furnace. Tekanan keluaran crude oil = 0,402 kg kg/cm² = 5,718 psi + 14,7 psi = 20,418 psi.

$$T \text{ Crude Oil out} = 326,42 \text{ }^\circ\text{C} = 619,556 \text{ }^\circ\text{F}$$

Dengan memanfaatkan fig. 5.27 pada temperatur titik didih, diperoleh nilai T EFV pada tekanan 20,418 psi sebesar 505 °F. Selisih titik didih antara kondisi standar dan sebenarnya adalah 55 °F. Oleh karena itu, kurva distilasi EFV pada tekanan 20,496 psi disusun sejajar dengan kurva distilasi

EFV pada tekanan 14,7 psi, yaitu ditambahkan *intercept* sebesar 55 °F. Berdasarkan grafik tersebut, pada suhu keluaran *furnace* sebesar 619,556 °F, diperoleh persentase *crude oil* yang teruapkan sebesar 60%.

B. Perhitungan Panas Keluar

1. Panas Terserap Crude Oil Fasa Cair (Qa)

$$Qa = m \times L \dots\dots\dots(12)$$

$$Qa = 1280,604 \frac{\text{gal}}{\text{Jam}} \times 351 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}$$

$$= 449492,01 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

2. Panas Terserap Crude Oil Fasa Uap (Qb)

$$Qb = m \times H \dots\dots\dots(13)$$

$$Qb = 1920,906 \frac{\text{gal}}{\text{jam}} \times 430 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}$$

$$= 825989,58 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

3. Panas Terserap gas hasil Pembakaran Kering (Q1')

$$Q1' = \text{Berat gas asap} \times C_{FG} \times \Delta T \dots\dots\dots(14)$$

$$Q1' = 78863,8285 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 0,238 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (32-0)^\circ\text{C} \times 3,97 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

$$Q1' = 519937,944 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

4. Panas terserap Oleh Asap Uap Air Dalam Gas Asap Karena Adanya H2 Dalam Bahan Bakar (Q2')

$$Q2' = 9H_2 \times H_{\text{sup}} \times \text{penggunaan FO} \dots\dots\dots(15)$$

$$Q2' = 9(0,1279) \times 687,1967 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 5332,5990 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 3,968 \frac{\text{Btu}}{\text{kcal}}$$

$$= 36508371,051 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

5. Panas terserap Oleh Uap Air Dalam Gas Asap Karena Kandungan Air (H2O) Dalam Udara Bahan Bakar (Q3')

$$Q3' = W \times Ma \times H_{\text{sup}} \times \text{Fuel Oil} \dots\dots\dots(16)$$

$$Q3' = 0,1 \times 687,1967 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 11628,9 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 3,968 \frac{\text{Btu}}{\text{kcal}}$$

$$= 3170987,432 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

6. Panas Yang Terbawa Oleh Uap Air Dalam Gas Karena Kelembabaan Udara Dalam Bahan Bakar (Q4')

$$Q4' = WA \times Ma \times H_{\text{sup}} \times \text{fuel oil} \dots\dots(17)$$

$$Q4' = 24,65 \frac{\text{kg}}{\text{kg bahan bakar}} \times 0,027 \times \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times 111628,9 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 3,968 \frac{\text{Btu}}{\text{kcal}}$$

$$= 21106763,74 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

7. Panas Hilang Melalui Dinding Furnace (Q5')

$$Q5' = h_i \times A \times (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(18)$$

$$Q5' = \frac{\text{Btu}}{\text{jam.ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}} \times \text{ft}^2 \times ((635,67 - 549,27)^\circ\text{R})$$

$$= 795694,1505 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

8. Total Panas Keluar (Qout)

$$Q_{\text{out}} = Qa + Qb + Q1' + Q2' + Q3' + Q4' + Q5' \dots\dots\dots(19)$$

$$Q_{\text{out}} = (449,492.01 + 825,989.58 + 5,199,937.94 + 36,508,371.05 + 3,170,987.4 + 21,106,763.74 + 795,694.15) \text{ Btu/jam}$$

$$Q_{\text{out}} = 6,805,723,590 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}$$

C. Perhitungan Effisiensi Furnace

$$\text{Effisiensi} = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\% \dots\dots\dots(20)$$

$$\text{Effisiensi} = \frac{6,805,723,590 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}}{47,358,500,643 \frac{\text{Btu}}{\text{jam}}} \times 100\%$$

$$\text{Effisiensi} = 85,703\%$$

Penelitian ini menganalisis proses pemanasan minyak mentah menggunakan *furnace* di PPSDM Migas Cepu. *Furnace* berfungsi menghasilkan energi panas melalui pembakaran *fuel oil* maupun *fuel gas*, yang selanjutnya dipakai untuk menaikkan temperatur minyak mentah sebelum dialirkan pada fraksinasi kolom. Proses pemanasan ini ialah menyesuaikan temperatur minyak mentah agar sesuai kebutuhan persyaratan operasional pada tahap produksi berikutnya.

Mekanisme perpindahan kalor dalam tungku berlangsung melalui tiga jenis utama diantaranya konduksi, konveksi, dan radiasi[4]. Perpindahan panas secara konduksi dipicu oleh gradien temperatur yang terbentuk antara permukaan luar dan dinding dalam pipa *furnace*. Konveksi berlangsung akibat Perpindahan panas secara konveksi dihasilkan dari selisih temperatur antara permukaan interior pipa dan minyak mentah yang mengalir di dalam saluran tersebut. Di sisi lain, perpindahan energi secara radiasi diakibatkan oleh emisi gelombang elektromagnetik dari nyala api pembakaran bahan bakar yang langsung mengenai permukaan eksternal tabung *furnace*[6].

Efisiensi *furnace* diperoleh dengan analisis perbandingan jumlah energi kalor yang berhasil diserap oleh minyak mentah dengan energi panas yang dihasilkan dari pembakaran. Besarnya nilai efisiensi mencerminkan sejauh mana *furnace* mampu memanfaatkan energi panas dalam proses pemanasan *crude oil*. Terdapat beberapa aspek krusial yang menentukan tingkat efisiensi *furnace*, mencakup performa sistem pengapian pada *burner*, tingkat kelengkapan pembakaran, kondisi kebersihan permukaan tabung, serta besarnya radiasi kalor yang terlepas. Unit *burner* perlu dikalibrasi dengan tepat untuk mencegah konsumsi bahan bakar yang berlebihan, sementara reaksi oksidasi harus mencapai kondisi stokiometrik agar tidak menghasilkan emisi gas buang dalam jumlah besar yang berdampak pada penurunan efisiensi dan peningkatan polusi. Permukaan tube juga harus dipastikan bebas dari kontaminasi untuk mencegah akumulasi endapan karbon yang dapat bertindak sebagai isolator dan mengganggu proses transfer panas. Lebih lanjut, upaya untuk mencegah kebocoran energi termal harus dilakukan secara maksimal guna memastikan bahwa panas tidak hilang melalui cerobong asap atau radiasi dari dinding tungku.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi *Furnace-03* di PPSDM Migas Cepu adalah sebesar 85,703% dengan total panas masuk sebesar 47.358.500,643 Btu/jam dan total panas keluar sebesar 6.805.723,590 Btu/jam. Total panas masuk (Q_{in}) diperoleh dari penjumlahan seluruh komponen panas yang berkontribusi pada proses pembakaran, yaitu panas hasil pembakaran bahan bakar (Q_1), panas sensibel bahan bakar (Q_2), panas yang terbawa oleh umpan *crude oil* (Q_3), panas pembakaran flue gas (Q_4), panas sensibel flue gas (Q_5), panas dari automizing steam (Q_6), panas udara pembakaran (Q_7), dan panas sensibel akibat kelembapan udara (Q_8).

Sementara itu, total panas keluar (Q_{out}) diperoleh dari penjumlahan seluruh komponen panas yang dilepaskan dari sistem, meliputi panas yang terserap *crude oil* fasa cair (Q_a), panas yang terserap *crude oil* fasa uap (Q_b), panas gas hasil pembakaran kering (Q_1'), panas yang terbawa uap air hasil pembakaran hidrogen bahan bakar (Q_2'), panas akibat kandungan uap air dalam udara bahan bakar (Q_3'), panas karena kelembapan udara (Q_4'), serta panas hilang melalui dinding *furnace* (Q_5'). Nilai ini masih berada dalam rentang kelayakan menurut literatur, yaitu 60–90% [10], sehingga *Furnace-03* tetap layak dipakai dalam proses pemanasan *crude oil*. Namun demikian, terdapat penurunan efisiensi dibandingkan kondisi ideal. Faktor utama penyebab penurunan tersebut adalah usia peralatan yang sudah lama, adanya kelebihan suplai udara (*excess air*),

serta keausan pada komponen bagian *furnace* seperti *refractory*, tube, dan *burner*. Kondisi tersebut dapat menimbulkan kebocoran panas maupun penurunan kualitas pembakaran, sehingga efisiensi menurun dan emisi meningkat [11].

KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan, efisiensi *Furnace-03* di PPSDM Migas Cepu diperoleh sebesar 85,703%. Rentang efisiensi *furnace* yang masih dianggap memenuhi kelayakan adalah 60–90% [10], sehingga *Furnace-03* dinyatakan masih dapat dioperasikan. Adapun penurunan efisiensi disebabkan oleh usia peralatan yang sudah tua, adanya kelebihan suplai udara (*excess air*), serta kehilangan panas yang terjadi melalui dinding maupun cerobong.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. E. Davis, Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers. Courier Corporation, 2013.
- [2] W. C. Edminister, Applied Hydrocarbon Thermodynamics, Vol. 1. Houston: Guff Publishing, 1961
- [3] M. Filippini, F. Rossi, A. Presciutti, S. De Ciantis, B. Castellani, and A. Carpinelli, "Thermal analysis of an industrial furnace," Energies, vol. 9, no. 10, p. 833, 2016.
- [4] R. C. Gupta, Fuels, Furnaces and Refractories, 3rd ed. PHI Learning Private Limited, 2016.
- [5] K. Kataoka, Transport Process Chemical Engineering Phase II Edition. Transport Process Chemical Engineering, pp. vi-1, 2023.
- [6] P. Mullinger and B. Jenkins, Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd., 2014.
- [7] W. L. Nelson, Petroleum Refinery Engineering, 4th ed. New York: McGraw Hill, 1958.
- [8] R. H. Perry, Perry's Chemical Engineering Handbook, 6th ed. New York: McGraw Hill, 1967.

[9] I. D. Pranowo, Sistem dan Manajemen Pemeliharaan (Maintenance: System and Management), 1st ed. Yogyakarta: Deepublish Publisher, 2019.

[11] Yuliani, "Evaluasi Kinerja Furnace-3 Ppt Migas Cepu," Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia, pp. 1–6, 2011.

[10] W. Trinks, Referensi Industrial Furnace. Jakarta: Penerbit Erlangga, 2000.

EVALUASI TORSI ELECTRIC ENGINE PROTOTYPE PERAHU LISTRIK NELAYAN MENGGUNAKAN METODE PRONY BRAKE

Ahmad Ilham Ramadhani^{1*}, Andie Murtono²

¹ Program Studi Mekanisasi Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung

Jalan Tandurusa Kotak Pos 12/BTG, Kota Bitung, Sulawesi Utara

ilham.ramadhani@kkp.go.id¹

Abstrak

Teknologi perahu nelayan berbasis sistem penggerak motor listrik telah dikembangkan sebagai salah satu inovasi kendaraan laut. Perahu listrik dapat bergerak dengan adanya gaya torsi yang dihasilkan dari motor listrik untuk memutar poros motor yang terhubung dengan propeller. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi gaya torsi yang dihasilkan oleh electric engine dengan metode prony brake. Metode penelitian adalah eksperimental dengan pendekatan terhadap variasi beban, variasi diameter eksternal pulley poros motor, dan variasi putaran motor. Hasil perhitungan eksperimen menunjukkan bahwa pengujian prony brake dapat digunakan sebagai instrumen dalam metode pendekatan untuk menghitung torsi. Nilai torsi dipengaruhi oleh diameter pulley, variasi beban, dan variasi putaran awal motor. Nilai torsi terbesar pada variasi beban dan diameter pulley yakni pada diameter pulley 3 inci dan beban 8 kg, yakni 3,10 Nm. Perubahan putaran poros motor (rpm) mempengaruhi peningkatan torsi. Nilai torsi terbesar pada variasi putaran yakni pada 800 rpm dan beban 8kg pada setiap variasi diameter; 4,31 Nm (2 inci), 5,34 Nm (2,5 inci), 6,46 Nm (3 inci). Torsi yang diperoleh digunakan sebagai acuan dalam menentukan kemampuan electric engine dan kemampuan prototipe perahu nelayan selama beroperasi di laut.

Kata kunci : motor listrik, perahu, prony brake, torsi

Abstract

Fishing boat technology utilizing an electric motor drive system has been developed as one of the innovations in marine vehicle design. Electric boats can move using the torque force generated from the electric motor to rotate the motor shaft, which is connected to the propeller. The aim of this research is to evaluate the torque force produced by an electric engine using the prony brake method. The research method is experimental with an approach to load variations, variations in the external diameter of the motor shaft pulley, and variations in motor rotation. The results of experimental calculations show that the prony brake test can be used as an instrument in the approach method for calculating torque. The torque value is influenced by the pulley diameter, load variations, and variations in the initial rotation of the motor. The largest torque value for variations in load and pulley diameter is at a pulley diameter of 3 inches and a load of 8 kg, namely 3.10 Nm. Changes in motor shaft rotation (rpm) affect the increase in torque. The largest torque value in the rotation variation is at 800 rpm and a load of 8kg for each diameter variation; 4.31 Nm (2 inches), 5.34 Nm (2.5 inches), 6.46 Nm (3 inches). The torque obtained is used as a reference in determining the capabilities of the electric engine and the capabilities of the fishing boat prototype while operating at sea.

Key words : boat, electric engine, prony brake, torque

PENDAHULUAN

Perahu konvensional yang sering digunakan oleh masyarakat nelayan di perairan Kota Bitung yakni perahu pakura. Perahu pakura masih menggunakan *gasoline engine* dengan BBM jenis bensin dan putaran mesin yang dihasilkan dari proses *internal combustion engine* (ICE) [1].

Observasi langsung terhadap beberapa jenis perahu pakura menunjukkan bahwa ukuran utama perahu panjang = 3 - 4 m, lebar = 0,8 - 1 m, dan draft = 0,5 m.

Sistem penggerak perahu jenis *gasoline engine* memiliki beberapa kondisi yang sering ditimbulkan, meliputi; (1) tingginya emisi gas buang, (2) peningkatan jumlah konsumsi bahan bakar, dan (3) keterbatasan *gasoline engine* saat perahu beroperasi [2]. Beberapa masalah dan kondisi

yang ada dapat diubah dengan mengganti sistem penggerak dengan pemanfaatan motor listrik/*electric engine* [3]. Implementasi *electric engine* dipilih karena didasarkan sistem penggerak yang tidak menimbulkan emisi gas buang, tingkat konsumsi sumber energi dari baterai, dan waktu operasi yang lama. Perkembangan penelitian *electric engine* sebelumnya masih berfokus pada karakteristik baterai sebagai sumber energi listrik perahu [4]. Selain berkenaan dengan sumber energi, beberapa penelitian lain juga mengkaji berkenaan dengan distribusi beban terhadap perahu yang dengan konfigurasi peletakan sistem penggerak, baterai, juru kemudi di buritan perahu [5].

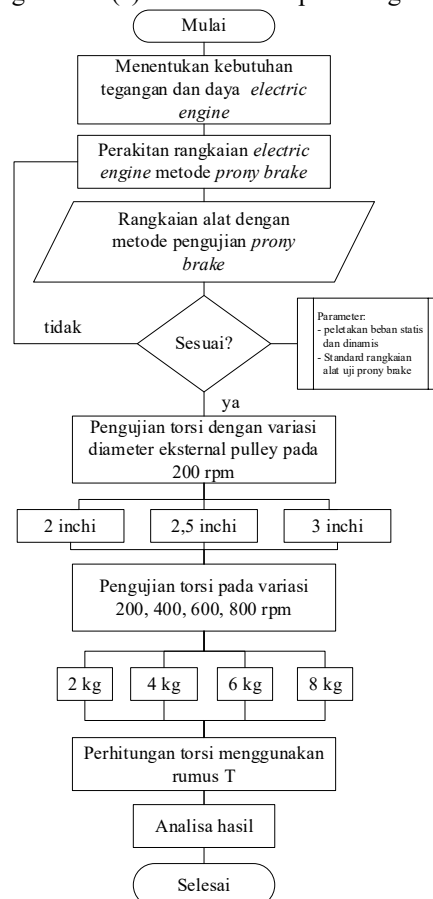
Inovasi pemanfaatan *electric engine* saat ini perlu untuk dilengkapai dengan tidak hanya terfokus pada sumber energi dan distribusi beban pada perahu. Penelitian pemanfaatan *electric engine* juga membutuhkan evaluasi lebih mendalam berkenaan tentang hubungan antara komponen utama baterai dan motor listrik, meliputi sumber energi dan torsi yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya telah mengkaji faktor suplai energi pada *electric engine* yakni bersumber dari baterai [6], sedangkan pada proses perahu bergerak membutuhkan torsi yang dihasilkan oleh motor listrik. Faktor torsi pada *electric engine* berperan untuk memutar poros motor yang terhubung dengan *connecting road* dan *propeller* [7]. Perahu pakura yang dengan konsep *electric engine* perlu untuk memperhitungkan besar torsi [8]. Torsi merupakan gaya putar yang dihasilkan oleh mesin untuk menggerakkan kendaraan dari posisi diam.

Penentuan besar torsi minimum yang dibutuhkan oleh perahu pakura, dapat diuji pada skala laboratorium dengan metode *prony brake*. Prinsip penentuan torsi dengan metode *prony brake* yakni adanya putaran torsi dipengaruhi oleh beban yang diterima, diameter eksternal *pully*, dan variasi putaran motor listrik. Bagian poros motor listrik menerima beban total akibat putaran *propeller* sehingga mempengaruhi besar torsi yang dihasilkan [9].

Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk menghitung dan mengevaluasi besar torsi yang mampu dihasilkan oleh motor listrik berdasarkan metode *prony brake*. Tahapan penelitian berfokus pada simulasi mekanis berdasarkan variasi beban 2 kg s.d. 8 kg, menggunakan interval kenaikan 2 kg. dengan variasi diameter eksternal 2 inchi, 2,5 inchi, dan 3 inchi. Setiap variasi beban dan variasi diameter dilakukan variasi putaran rpm. Hasil pengamatan dan perhitungan dengan metode *prony brake*, selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan torsi minimal yang mampu dihasilkan oleh *electric engine*.

METODE PENELITIAN

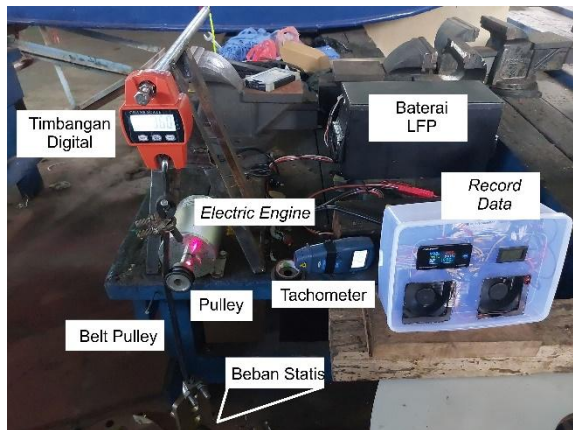
Alat dan bahan pada penelitian ini meliputi: Motor Brushless BLDC, Baterai LFP, Timbangan Digital “Crane Scale” 300 kg, variasi beban 2 kg s.d. 8 kg, Pulley diameter 2 inchi, 2,5 inchi, dan 3 inchi. Data pengujian diperoleh dari hasil eksperimen dan perhitungan. Diagram alir penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1, terdiri beberapa meliputi; (a) perancangan alat, (b) penimbangan berat beban, (c) perakitan beban pada rangkaian alat dan (d) perhitungan torsi (e) evaluasi hasil perhitungan.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Komponen alat dirangkai menjadi *experimental setup*. Selanjutnya pengambilan data dilakukan pada kondisi ruangan yang sama agar untuk meminimalisir adanya getaran, gesekan, maupun tingkat keausan *v-belt* yang digunakan pada percobaan. Rangkaian uata dimulai dari baterai LFP yang menyuplai energi listrik ke sistem *electric engine*. Listrik yang masuk pada *electric engine* melalui *controller* diubah menjadi energi mekanis untuk menggerakkan *ass electric engine* yang terhubung dengan *pulley*. Untuk mengetahui besar torsi yang mampu dihasilkan, maka *electric engine* diberikan variasi beban yang digantung dengan

mengetahui berat awal W_1 dan W_2 selama percobaan. Data yang diperoleh selanjutnya dihitung dengan persamaan untuk mendapatkan nilai torsi. Ilustrasi *experimental setup* ditunjukkan pada Gambar 2.

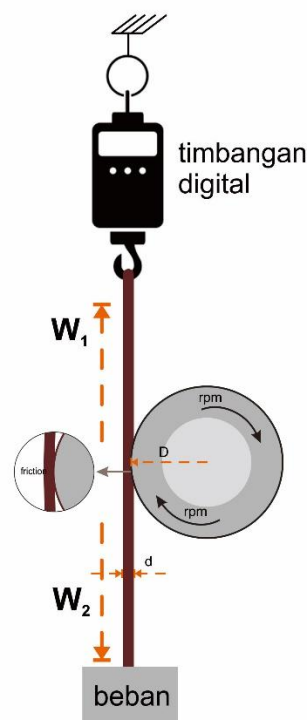


Gambar 2 Rangkaian Alat Pengujian

Prinsip pengujian torsi *electric engine* dengan metode *prony brake* yakni menguji kemampuan *electric engine* dalam menghasilkan besar torsi dengan diberikan hambatan/pengeraman menggunakan variasi beban. Ilustrasi Sistem *prony brake dynamometer* ditunjukkan pada Gambar 3.

Pulley akan bergerak secara rotasi mengikuti putaran poros motor. Kedua komponen yang terhubung tersebut mengalami hambatan/gesekan dari *belt* yang digantung dengan variasi beban, sehingga putaran poros motor kan berkurang dan menyebabkan perubahan pada nilai torsi yang dihasilkan. Proses pengujian torsi terhadap *electric engine* dengan metode *prony brake* dilakukan melalui tahapan pengaturan alat dan pengoperasian alat uji.

Pada tahap pengoperasian *electric engine* disuplai oleh baterai yang kebutuhan didasarkan pada *working voltage*. *Electric engine* dirangkai dengan komponen tambahan untuk mendapatkan pengaturan rangkaian *prony brake* [10]. Komponen dirangkai dengan menggantungkan beban pada *belt* yang mengenai pada *pulley*. Nilai beban yang dimunculkan pada alat timbangan selanjutnya dibaca sebagai beban sesuai dengan variasi setiap beban.



Gambar 3 Sistem *Prony Brake Dynamometer*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi pulley dengan diameter eksternal 2 inchi, 2,5 inchi, dan 3 inchi dan setiap pulley diujicobakan dengan pembebanan statis 2 kg s.d. 8 kg. Selanjutnya *electric engine* dioperasikan berdasarkan rpm tetap dan variasi rpm. Pada saat pengujian, nilai beban yang ada pada timbangan akan mengalami perubahan selama terjadinya gesekan antara *pulley* dan *belt*.

Penentuan torsi dilakukan dengan metode pendekatan *prony brake* dengan menggunakan turunan persamaan dalam menentukan torsi (Nm) [11].

$$T = (W_2 - W_1) \times \frac{D_p}{2} \dots\dots\dots(1)$$

- dimana;
- T = torsi (N.m)
- W_2 = pembacaan pada timbangan (N)
- W_1 = beban W (N)
- D_p = diameter (d. pulley + d. tali) (cm)

Hasil perhitungan dari persamaan 1, selanjutnya dievaluasi untuk mengetahui kemampuan torsi *electric engine* yang akan digunakan pada perahu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prony brake merupakan metode keilmuan dalam bidang teknik mesin yang berfungsi untuk

mengetahui besar torsi (N.m) yang dihasilkan oleh *electric engine*. Prinsip kerja dalam metode pendekatan *prony brake* yakni adanya perubahan beban (W) yang diakibatkan adanya gesekan antara belt dengan bidang diameter *pulley*. Penelitian yang dilakukan oleh [12] dan [13] menjelaskan bahwa metode *prony brake* memanfaatkan adanya prinsip hambatan/pengereman yang dihasilkan akibat adanya gesekan mekanik antara permukaan *pulley* dengan *belt*. Nilai hambatan mekanik dapat dikonfigurasi berdasarkan nilai W yang ditumpu oleh tuas. Nilai torsi merupakan gaya yang dapat diketahui dari hasil persamaan antara berat beban dengan panjang tuas penumpu.

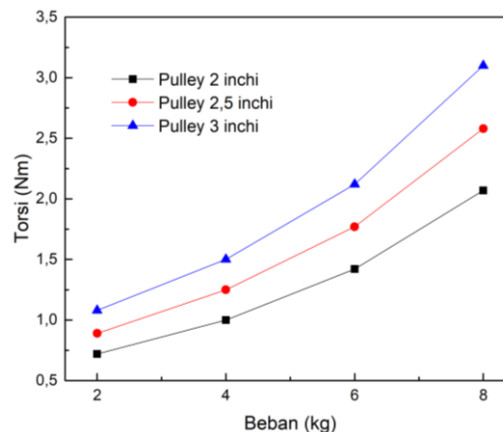
Evaluasi Torsi *Electric engine* dengan Metode *Prony brake* Pada RPM Tetap

Pengujian *prony brake* merupakan metode pendekatan eksperimental yang bertujuan untuk menghitung besar torsi (N.m) yang mampu dihasilkan oleh *electric engine*. Proses pengujian dilakukan dengan menerapkan pembebanan statis pada variasi 2 kg s.d. 8 kg. Berat beban tersebut kemudian dikonversi untuk menjadi newton karena dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Hasil pengujian pada Tabel 1, menunjukkan torsi yang dihasilkan dari perbedaan diameter *pulley* dan variasi beban pada putaran motor 200 rpm.

Tabel 1 Nilai Torsi Metode *Prony Brake* 200 rpm

Beban (kg)	Torsi (N.m)		
	2 inchi	2,5 inchi	3 inchi
2	0,72	0,89	1,08
4	1,00	1,25	1,50
6	1,42	1,77	2,12
8	2,07	2,58	3,10

Pada Gambar 4, ditunjukkan grafik hubungan antara beban dan torsi pada setiap variasi perbedaan diameter *pulley*. Berdasarkan hasil eksperimen dan perhitungan dapat dijelaskan bahwa penambahan nilai W, menunjukkan nilai torsi yang dihasilkan juga semakin besar pada diameter *pulley* yang sama. Sedangkan pada pembebanan statis yang sama, menunjukkan adanya peningkatan besar torsi yang dihasilkan oleh *electric engine* pada variasi diameter *pulley*.



Gambar 4 Nilai Torsi pada Perbandingan Diameter Pulley

Berdasarkan kedua fenomena tersebut dapat dianalisa bahwa perubahan torsi yang diperoleh dengan metode *prony brake* pada kondisi rpm yang tetap, disebabkan adanya perubahan variasi berat (W) dan variasi diameter *pulley*. Pada pengujian dengan variasi beban yang semakin berat, dapat menyebabkan beban semakin bergerak ke bawah akibat adanya massa dan gravitasi. Dalam kondisi pengujian tersebut, *electric engine* cenderung membutuhkan gaya yang lebih besar untuk memutar poros motor. Besar torsi yang dihasilkan merupakan inisiasi gaya awal yang dibutuhkan *electric engine* dari posisi diam menjadi bergerak secara rotasi. Pada pengujian dengan diameter *pulley* yang semakin besar, dapat menyebabkan adanya gesekan antara *pulley* dengan *v-belt* yang semakin lebar. Gesekan yang terjadi menyebabkan adanya resistansi dan/atau hambatan secara langsung.

Peningkatan besar torsi pada penelitian bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh [14] menjelaskan bahwa torsi yang dihasilkan oleh *electric engine* merupakan gaya awal yang dibutuhkan oleh motor untuk menggerakkan pada bagian poros. Nilai torsi yang dihasilkan disebabkan adanya pengaruh beban dan gesekan pada pulley. Penelitian lain yang bersesuaian berkenaan besar torsi oleh [15] menjelaskan bahwa torsi yang dihasilkan oleh *electric engine* dapat mengalami perubahan akibat adanya hambatan yang semakin besar. Pada kondisi perairan, *electric engine* yang digunakan akan menerima hambatan berupa gelombang air laut dan kecepatan angin pada lambung perahu pakura.

Evaluasi Torsi *Electric Engine* dengan Metode *Prony brake* Pada Variasi RPM

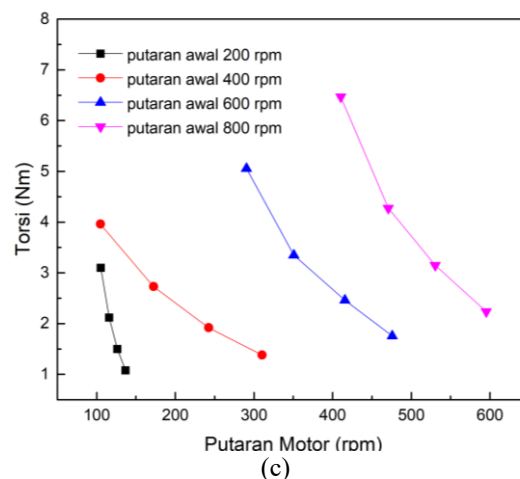
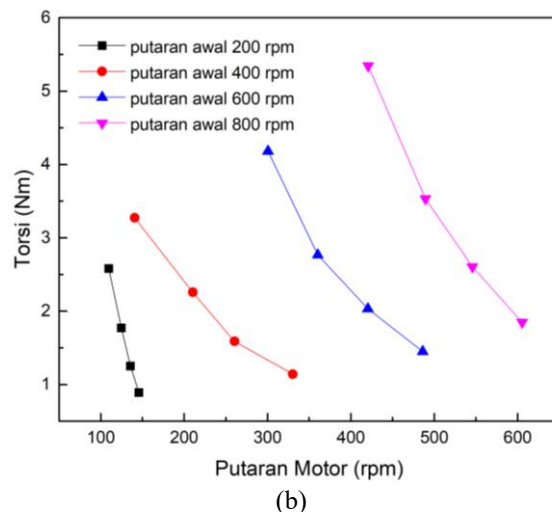
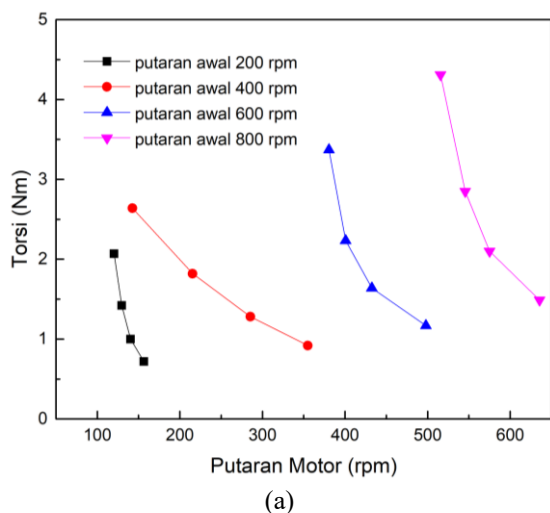
Pengujian *prony brake* tidak hanya dapat digunakan dalam menentukan besar torsi yang dihasilkan oleh *electric engine* pada putaran motor yang sama. Pada penelitian ini dilakukan pengujian

untuk menentukan torsi *electric engine* akibat adanya variasi putaran motor. Proses pengujian juga dilakukan terhadap variasi beban dengan menggunakan tiga ukuran diameter *pulley* yang berbeda. Selanjutnya ditentukan nilai yang tertera pada alat pembaca timbangan dinotasikan sebagai nilai W1 dan perubahan nilai berat dinotasikan sebagai W2. Nilai perubahan yang diperoleh selanjutnya dihitung dengan persamaan untuk menentukan torsi yang mampu dihasilkan oleh *electric engine*.

Hasil pengujian pada Tabel 2, menunjukkan torsi yang dihasilkan dari perbedaan diameter pulley, variasi beban, dan variasi rpm.

Tabel 2 Nilai Torsi Metode *Prony brake*

Beban (kg)	Torsi (N.m)			
	200	400	600	800
D = 2 inchi				
2	0,72	0,920	1,170	1,490
4	1,00	1,280	1,640	2,100
6	1,42	1,820	2,232	2,850
8	2,07	2,640	3,370	4,310
D = 2,5 inchi				
2	0,89	1,141	1,451	1,848
4	1,25	1,587	2,034	2,604
6	1,77	2,257	2,768	3,534
8	2,58	3,274	4,179	5,344
D = 3 inchi				
2	1,08	1,380	1,755	2,236
4	1,5	1,921	2,461	3,151
6	2,12	2,731	3,349	4,276
8	3,1	3,961	5,056	6,467



Gambar 5 Torsi Pada Variasi RPM Dengan Diameter Pulley (a) 2, (b) 2,5, dan (c) 3 inchi

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5 menunjukkan adanya grafik yang memiliki kesamaan pada setiap variasi diameter *pulley*. Dapat dijelaskan bahwa penggunaan ukuran diameter *pulley* yang semakin besar, maka akan terjadi dua fenomena; (1) peningkatan nilai torsi pada nilai W yang sama, dan (2) peningkatan nilai torsi pada variasi pembebanan statis. Kedua fenomena tersebut terjadi akibat adanya perubahan putaran motor (rpm).

Dua kondisi yang terjadi pada pengujian variasi rpm dapat dianalisis bahwa *electric engine* dapat mengalami perubahan kecepatan ketika rpm motor mengalami fluktuasi. Putaran motor bergerak secara rotasi saat dikenai beban W1, akan menghasilkan gaya awal yang dibutuhkan untuk memutar pulley. Akibat adanya poros motor yang berputar, maka pulley juga berputar searah poros motor. Gesekan yang terjadi antara v-belt yang digunakan untuk menggantung beban dengan pulley

menyebabkan nilai berat pada alat pembaca timbangan berubah menjadi semakin berat dan dinotasikan sebagai W2.

Putaran motor (rpm) yang semakin cepat akan menyebabkan terjadinya gesekan antara pulley dan *v-belt*. Gesekan dalam periode yang begitu cepat membutuhkan putaran poros motor yang cepat pula. Sehingga *electric engine* akan merespon dengan menghasilkan torsi yang dibutuhkan sesuai dengan perubahan kondisi poros motor. Fenomena yang terjadi pada eksperimen bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh [16] dan [17] dengan metode *prony brake* dapat diketahui pengaruh perubahan torsi dan kecepatan akibat adanya perubahan pembebanan. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa putaran motor dapat meningkatkan torsi yang selaras dengan peningkatan kecepatan kendaraan.

Prototipe perahu nelayan jenis pakura yang beroperasi di perairan laut dapat mengalami berbagai kondisi yang tidak menentu, meliputi ombak tinggi, kecepatan angin yang tinggi, cuaca buruk, arus laut, dan arah angin laut. Beberapa kondisi tersebut dapat berdampak secara langsung pada kemampuan sistem penggerak perahu. Pada saat awal sebelum beroperasi, torsi yang dihasilkan berperan dalam menghasilkan gaya untuk menggerakkan perahu dari posisi diam. Apabila prototipe perahu nelayan terkena ombak dan gelombang yang besar maka diperlukan torsi yang besar pula agar perahu nelayan dapat bergerak sesuai lajur pelayaran dan tidak terbawa ombak atau arus laut. Putaran awal yang diinputkan ke *electric engine* berperan dalam menghasilkan torsi. Semakin tinggi kecepatan awal yang diberikan, maka akan terjadi peningkatan kemampuan torsi. Menurut Belinda [11], diameter *pulley* berpengaruh terhadap besar torsi yang dihasilkan. Sehingga nilai torsi yang mampu dihasilkan oleh *electric engine* pada prototipe perahu nelayan perlu diperhatikan sebagai acuan kemampuan awal perahu sebelum beroperasi.

KESIMPULAN

Pemanfaatan *electric engine* sebagai salah satu inovasi sistem penggerak prototipe perahu nelayan jenis pakura perlu untuk mengevaluasi nilai torsi yang mampu dihasilkan. Torsi yang dihasilkan berperan untuk mengubah perahu dari posisi diam hingga bergerak. Implementasi pengukuran torsi berdasarkan metode *prony brake* dapat digunakan sebagai metode alternatif untuk menentukan torsi dalam skala laboratorium. Evaluasi torsi didasarkan pada variasi beban, variasi diameter *pulley*, dan variasi rpm awal. Ketiga faktor tersebut saling berkaitan dalam menghasilkan perubahan nilai torsi.

Implikasi langsung yang dapat dikaji yakni pada kondisi *propeller* semakin dalam dari permukaan air laut, maka besar resistansi yang dihasilkan juga semakin besar. Kondisi tersebut menyebabkan nilai torsi juga semakin besar.

Nilai torsi yang dihasilkan pada putaran rpm tetap dipengaruhi oleh variasi beban dan diameter *pulley*. Nilai torsi terbesar pada variasi beban dan diameter pulley yakni pada diameter pulley 3 inchi dan beban 8 kg, yakni 3,10 Nm. Besar torsi yang dihasilkan pada variasi beban, menunjukkan trend peningkatan ketika semakin besar beban yang diterima oleh *electric engine*. Hal ini disebabkan adanya bidang gesekan yang lebih panjang karena beban yang lebih berat akan cenderung memberikan gesekan yang lebih besar. Trend peningkatan nilai torsi juga terjadi pada pembebanan statis yang menunjukkan adanya peningkatan besar torsi pada variasi diameter *pulley*. Hal ini disebabkan area gesekan lebih lebar, sehingga terjadi gesekan/*friction* lebih banyak.

Perubahan putaran poros motor (rpm) pada setiap variasi beban dan diameter *pulley* mempengaruhi peningkatan torsi. Nilai torsi terbesar pada variasi putaran yakni pada 800 rpm dan beban 8kg pada setiap variasi diameter; 4,31 Nm (2 inchi), 5,34 Nm (2,5 inchi), 6,46 Nm (3 inchi). Fenomena yang terjadi pada percobaan tersebut dapat disimpulkan bahwa *electric engine* mengalami perubahan nilai torsi yang berdampak pada perubahan kecepatan ketika rpm motor mengalami fluktuasi. Torsi yang diperoleh digunakan sebagai acuan dalam menentukan kemampuan *electric engine* dan kemampuan prototipe perahu nelayan selama beroperasi di laut.

Penelitian berkenaan pemanfaatan *electric engine* perlu untuk dikembangkan dalam hal peninjauan kemampuan baterai sebagai sumber utama dalam sistem penggerak. Sehingga dengan adanya kajian eksperimental tersebut, sistem penggerak menggunakan *electric engine* dapat dimanfaatkan oleh nelayan serta mampu menciptakan kendaraan laut *zero emission*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. S. Tumigolung, F. P. T. Pangalila, and F. E. Kaparang, "Studi tentang Pengaruh Perbedaan Daya Mesin terhadap Kecepatan dan Konsumsi Bahan Bakar Minyak pada Perahu Pakura," *J. Ilmu dan Teknol. Perikan. Tangkap*, vol. 2, no. 5, pp. 187–193, 2017.
- [2] A. Boretti, "Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines,"

- Froontiers Mech. Eng.*, vol. 5, no. 12, pp. 1–15, 2019, doi: 10.3389/fmech.2019.00064.
- [3] M. H. N. Aliffrananda, A. R. Safaruddin, H. Supomo, and S. Regitasyali, “Design of laminated bamboo fishing boat with local cultural heritage using electric motor to support fishing tourism in Pasuruan , East Java,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1052, no. 1, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1052/1/012032.
- [4] R. Reabroy, Y. Tiaple, S. Pongduang, and T. Nantawong, *The Possibility of using Electrical Motor for Boat Propulsion System*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.601.
- [5] M. Mehedi and T. Iqbal, “Optimal Sizing of a Hybrid Power System for Driving a Passenger Boat in Bangladesh,” *Conf. Pap.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1109/EPEC48502.2020.9319920.
- [6] D. Harjono, W. Widodo, H. Sugiarto, and A. Bakar, “Analisis Kapasitas Dan Pengisian Baterai Pada Mobil Listrik Ponocar,” *Electrotech. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2022.
- [7] V. T. Tuan, P. N. Huy, S. Phoemsapthawee, and S. Kreuawan, “E-Engine for a Long-Tail Boat , an Application in ASEAN (Association of Southeast Asian Nations) -Design and Comparison with Internal Combustion Engine,” *World Electr. Veh. Joirnal*, vol. 12, no. 36, pp. 1–11, 2021.
- [8] A. Amiadji, A. Baidowi, and A. Nanda Oktova, “Impact Analysis of Trim Tab Inclination Angles Variation to Propulsion Power Requirement of 6 Meter’s Speed Boat,” *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 175–184, 2021, doi: 10.12962/j25481479.v6i3.10639.
- [9] Muh. Irbabunnuha A, Y. M. Sholihin, and M. D. Trisno, “Rancang Bangun Alat Uji Torsi Tipe *Prony brake* Untuk Unjuk Kerja Mesin Motor Bakar Kapasitas 6,6 Kw,” *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 20–24, 2020, doi: 10.35814/teknobiz.v10i3.1759.
- [10] F. Laamena and A. Taihutu, “Kajian Optimasi Ukuran Kapal Tradisional dan Perhitungan Hambatannya,” *J. Metiks*, vol. 1, no. 1, pp. 17–22, 2021.
- [11] D. Belinda, Siswoyo, and B. Setiadi, “Rancang Bangun Dynamometer Model *Prony brake* untuk Alat Uji Motor Listrik,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, pp. 269–274, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4269>.
- [12] R. Hadiputranto, “Brake Untuk Sarana Praktikum Prestasi Mesin,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 11–18, 2015.
- [13] I. Herry and R. A. Pathur, “Pengujian Dinamometer *Prony brake* Untuk Praktikum Prestasi Mesin Motor Diesel,” *Univ. Lambung Mangkurat*, vol. 3, no. 1, pp. 28–34, 2014..
- [14] H. Maghfiroh, A. J. Titus, A. Sujono, F. Adriyanto, and J. S. Saputro, “Induction Motor Torque Measurement using *Prony brake*,” *Int. J. Robot. Control Syst.*, vol. 2, no. 3, pp. 594–605, 2022, doi: <http://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.782>.
- [15] S. Tjandra, A. Suhartono, and T. Salim Suswanto, “Simplification of the *Prony brake* Dynamometer System Using Brake Caliper Load,” *Int. J. Sci. Technol. Manag.*, vol. 4, no. 5, pp. 1351–1357, 2023, doi: 10.46729/ijstm.v4i5.920
- [16] M. Yahya, T. Sukmadi, and B. Winardi, “Perencanaan modul *prony brake* untuk penentuan karakteristik mekanik (torsi terhadapkecepatan) dan efisiensi motor induksi 3 fasa,” *Depaetemen Tek. Elektro, Univ. Diponegoro, Semarang.*, vol. vol 5, p. 421, 2016.
- [17] R. N. Situmorang, P. Manik, and A. Wi. B. Santosa, “Analisa Nilai Thrust Optimum Propeller Pada Kapal Tugboat Pelabuhan Paket-II 2x1850HP Dengan Variasi Diameter Propeller, Jumlah Daun Propeller & Kecepatan Putaran Propeller(RPM),” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, pp. 112–116, 2020.

ANALISIS BEBAN STATIS PADA BINGKAI PANEL SURYA YANG DAPAT BERFUNGSI SEBAGAI PENGGANTI ATAP BANGUNAN

Budiman¹, Rudi Irawan², Haris Rudianto³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma

Jl. Akses Kelapa Dua, Kelapa Dua, Cimanggis

trybudi14@gmail.com¹

Abstrak

Pada saat ini, atap serta panel surya merupakan dua fungsi yang berbeda. Fungsi atap sebagai penutup bagian atas bangunan, serta fungsi panel surya sebagai pembangkit listrik. Adapun pada penelitian ini berfokus untuk menggabungkan dua fungsi pada masing-masing benda menjadi satu. Dengan merekayasa model bingkai pada panel surya. Sehingga, panel surya dapat digunakan sebagai atap bangunan dan sebagai pembangkit listrik. Analisis yang dilakukan berupa pembebanan statis. Analisis statis terdiri dari *von misses stress*, *displacement* dan *safety factor* pada bingkai panel surya. Yang menjadi pembeda dalam analisis statis ini yaitu pada material yang digunakan. Terdapat 4 jenis aluminium yang digunakan yaitu aluminium *alloy* 1350, aluminium *alloy* 2024, aluminium *alloy* 3003 dan aluminium *alloy* 6061. Dihasilkan perbedaan yang signifikan pada *safety factor*, dengan hasil aluminium *alloy* 1350 sebesar 2,02, aluminium *alloy* 2024 sebesar 5,57, aluminium *alloy* 3003 sebesar 3,03 dan aluminium *alloy* 6061 sebesar 4,04.

Kata kunci : panel surya, bingkai panel surya, aluminium alloy.

Abstract

At present, roofs and solar panels are two different functions. The function of the roof is to cover the top of the building, and the function of solar panels is to generate electricity. This research focuses on combining the two functions of each object into one. By engineering a frame model on solar panels. Thus, solar panels can be used as a building roof and as a power plant. The analysis carried out in the form of static loading. The static analysis consists of von misses stress, displacement and safety factor on the solar panel frame. The difference in this static analysis is the material used. There are 4 types of aluminum used, namely aluminum alloy 1350, aluminum alloy 2024, aluminum alloy 3003 and aluminum alloy 6061. The resulting significant difference in safety factor, with the results of aluminum alloy 1350 of 2.02, aluminum alloy 2024 of 5.57, aluminum alloy 3003 of 3.03 and aluminum alloy 6061 of 4.04.

Key words : solar panel, solar panel frame, aluminum alloy.

PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang bisa menjadi alternatif penting bagi masyarakat dalam memenuhi kebutuhan pasokan listrik. Terutama bagi masyarakat Indonesia, yang memiliki letak geografis di lintang khatulistiwa dengan pencahayaan maksimal dan berada di daerah tropis dengan sinar matahari yang cukup banyak. Kondisi alam serta luas wilayah Indonesia membuat distribusi listrik secara merata menjadi sulit, sehingga penggunaan energi surya menjadi keharusan^[1]. Diharapkan energi surya dapat memenuhi kebutuhan masyarakat

akan pasokan energi dan bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik yang ramah lingkungan^[2].

Salah satu pemanfaatan energi surya yaitu dengan menggunakan panel surya, yang dikenal juga dengan *solar cell/ photovoltaic*. Panel surya merupakan alat yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disimpan ke dalam baterai, dan baterai tersebut bisa digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik peralatan elektronik sesuai kebutuhan^[1].

Pada fungsi tertentu, bingkai pada panel surya dibuat hanya untuk menahan panel surya agar dapat duduk pada bingkainya, akan tetapi tidak dapat menahan beban lebih yang diberikan.

Penelitian ini berfokus untuk menggabungkan dua fungsi pada masing-masing benda menjadi satu. Dengan merencanakan model bingkai pada panel surya. Sehingga, panel surya dapat digunakan sebagai atap bangunan dan sebagai pembangkit listrik.

METODE PENELITIAN

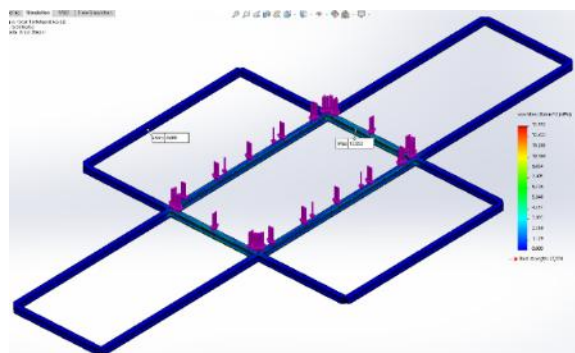
Dalam melakukan suatu penelitian dan perancangan, diawali dengan beberapa langkah yang harus dilakukan secara berurutan. Proses perancangan dalam pembuatan desain serta analisa kekuatan bingkai dilakukan dengan menggunakan software Solidworks 2019.

PC digunakan untuk mendesain dan menjelaskan proses simulasi. Selanjutnya untuk pengambilan data dengan baik dibutuhkan PC dengan spesifikasi yang cukup memadai. Adapun peralatan yang digunakan dalam proses perancangan ini, yaitu Bingkai dan komponen pendukung. Panel surya yang digunakan pada proses perancangan ini, yaitu Panel Surya 300 WP Shinyoku *Polycrystalline* dengan dimensi (1956 mm x 992 mm x 40 mm) dengan massa 20,65 kg.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Von Misses Stress Aluminium Alloy 1350

Pada simulasi yang dilakukan dengan material Aluminium Alloy 1350 dapat terlihat bahwa nilai maksimal tegangan yang diperoleh sebesar 13,646 MPa dan nilai terkecil sebesar 0 MPa. Tegangan *von mises* yang terjadi dikategorikan aman karena dibawah *yield strength* yaitu 27,574 MPa.

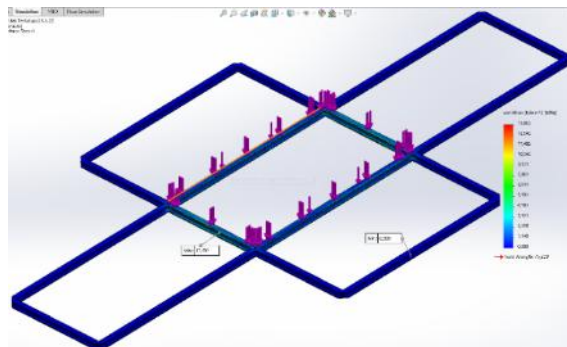


Gambar 1 *Von Misses Stress Aluminium Alloy 1350*

Von Misses Stress Aluminium Alloy 2024

Pada simulasi yang dilakukan dengan material Aluminium Alloy 2024 dapat terlihat bahwa nilai maksimal tegangan yang diperoleh sebesar

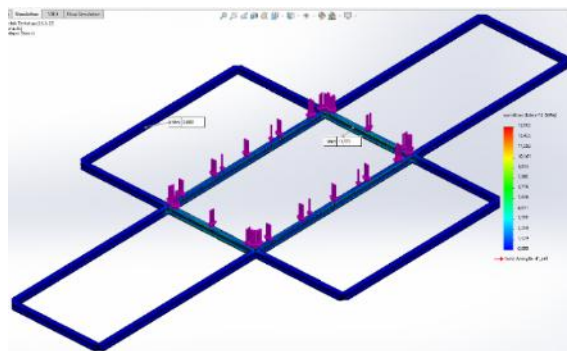
13,617 MPa dan nilai terkecil sebesar 0 MPa. Tegangan *von mises* yang terjadi dikategorikan aman karena dibawah *yield strength* yaitu 75,829 MPa.



Gambar 2 *Von Misses Stress Aluminium Alloy 2024*

Von Misses Stress Aluminium Alloy 3003

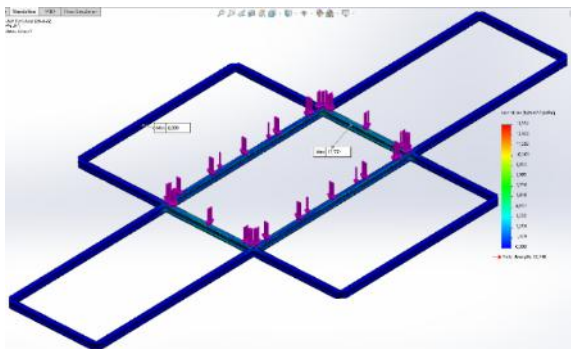
Pada simulasi yang dilakukan dengan material Aluminium Alloy 3003 dapat terlihat bahwa nilai maksimal tegangan yang diperoleh sebesar 13,646 MPa dan nilai terkecil sebesar 0 MPa. Tegangan *von mises* yang terjadi dikategorikan aman karena dibawah *yield strength* yaitu 41,361 MPa.



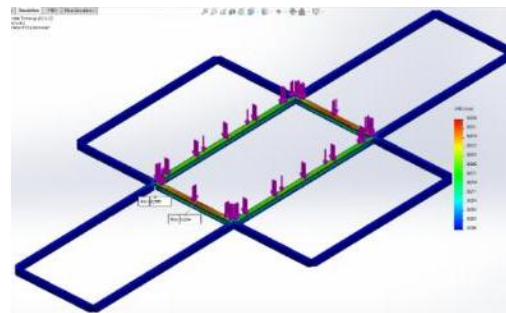
Gambar 3 *Von Misses Stress Aluminium Alloy 3003*

Von Misses Stress Aluminium Alloy 6061

Pada simulasi yang dilakukan dengan material Aluminium Alloy 6061 dapat terlihat bahwa nilai maksimal tegangan yang diperoleh sebesar 13,646 MPa dan nilai terkecil sebesar 0 MPa. Tegangan *von mises* yang terjadi dikategorikan aman karena dibawah *yield strength* yaitu 55,148 MPa.



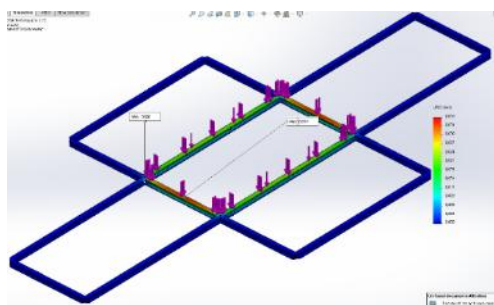
Gambar 4 Von Misses Stress Aluminium Alloy 6061



Gambar 6 Displacement Aluminium Alloy 2024

Displacement Aluminium Alloy 1350

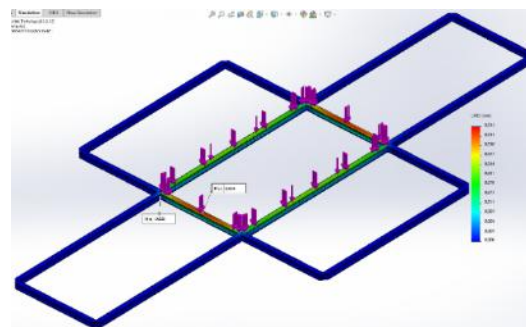
Displacement yang terjadi akibat tekanan yang diberikan pada bingkai dengan posisi nilai terbesar berada pada bagian tengah bingkai panel surya. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini yang warna biru merupakan nilai Displacement minimum sebesar 0.000 mm sedangkan nilai Displacement maksimum berwarna merah sebesar 0,036 mm. Posisi Displacement yang berada bagian tengah bingkai, berarti dapat disimpulkan beban yang diberikan pada bingkai terdistribusi secara baik. Displacement dikategorikan aman karena relatif kecil dan tidak menimbulkan perubahan besar pada struktur bingkai tersebut.



Gambar 5 Displacement Aluminium Alloy 1350

Displacement Aluminium Alloy 3003

Displacement yang terjadi akibat tekanan yang diberikan pada bingkai dengan posisi nilai terbesar berada pada bagian tengah bingkai panel surya. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini yang warna biru merupakan nilai Displacement minimum sebesar 0.000 mm sedangkan nilai Displacement maksimum berwarna merah sebesar 0,036 mm. Posisi Displacement yang berada bagian tengah bingkai, berarti dapat disimpulkan beban yang diberikan pada bingkai terdistribusi secara baik. Displacement dikategorikan aman karena relatif kecil dan tidak menimbulkan perubahan besar pada struktur bingkai tersebut.



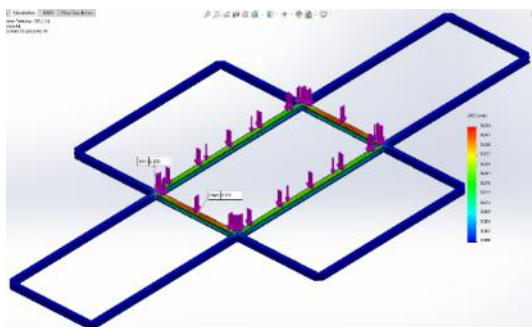
Gambar 7 Displacement Aluminium Alloy 3003

Displacement Aluminium Alloy 2024

Displacement yang terjadi akibat tekanan yang diberikan pada bingkai dengan posisi nilai terbesar berada pada bagian tengah bingkai panel surya. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini yang warna biru merupakan nilai Displacement minimum sebesar 0.000 mm sedangkan nilai Displacement maksimum berwarna merah sebesar 0,034 mm. Posisi Displacement yang berada bagian tengah bingkai, berarti dapat disimpulkan beban yang diberikan pada bingkai terdistribusi secara baik. Displacement dikategorikan aman karena relatif kecil dan tidak menimbulkan perubahan besar pada struktur bingkai tersebut.

Displacement Aluminium Alloy 6061

Displacement yang terjadi akibat tekanan yang diberikan pada bingkai dengan posisi nilai terbesar berada pada bagian tengah bingkai panel surya. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini yang warna biru merupakan nilai Displacement minimum sebesar 0.000 mm sedangkan nilai Displacement maksimum berwarna merah sebesar 0,036 mm. Posisi Displacement yang berada bagian tengah bingkai, berarti dapat disimpulkan beban yang diberikan pada bingkai terdistribusi secara baik.



Gambar 8 Displacement Aluminium Alloy 6061

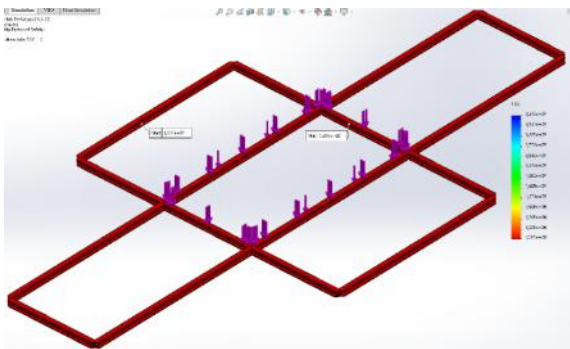
Safety factor

Faktor yang perlu diperhatikan dalam desain adalah faktor keamanan, yaitu menghasilkan bingkai panel surya yang aman dan kecil kemungkinan terjadinya malfungsi. Hasil pengujian yang berupa tingkat *Displacement* hanya menunjukkan pergerakan perpindahan maksimal yang terjadi pada bingkai saja. Sedangkan, *Von mises Stress* akan menunjukkan tegangan maksimal yang terjadi pada konstruksi.

Safety Factor Aluminium Alloy 1350

Besar kecilnya tegangan yang terjadi pada bingkai sangat mempengaruhi tingkat *safety factor*.

$$\eta = \frac{27,574 \text{ N/mm}^2}{13,646 \text{ N/mm}^2} = 2,02 \dots\dots\dots(1)$$

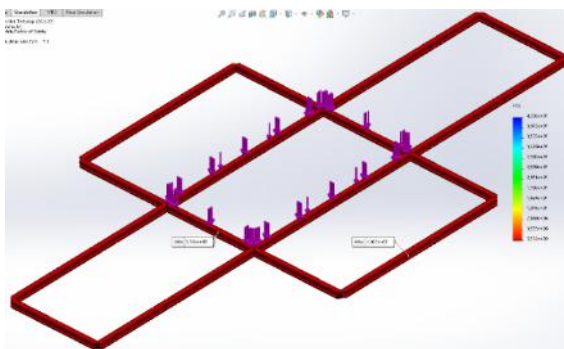


Gambar 9 Safety Factor Aluminium Alloy 1350

Safety Factor Aluminium Alloy 2024

Besar kecilnya tegangan yang terjadi pada bingkai sangat mempengaruhi tingkat *safety factor*.

$$\eta = \frac{75,829 \text{ N/mm}^2}{13,617 \text{ N/mm}^2} = 5,57 \dots\dots\dots(2)$$

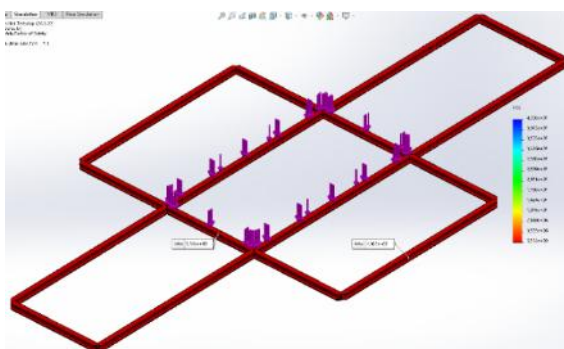


Gambar 10 Safety Factor Aluminium Alloy 2024

Safety Factor Aluminium Alloy 2024

Besar kecilnya tegangan yang terjadi pada bingkai sangat mempengaruhi tingkat *safety factor*.

$$\eta = \frac{75,829 \text{ N/mm}^2}{13,617 \text{ N/mm}^2} = 5,57 \dots\dots\dots(3)$$

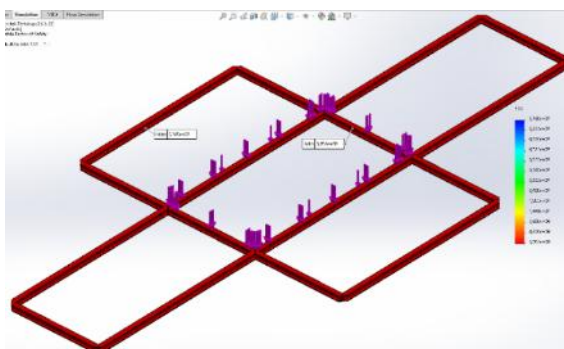


Gambar 11 Safety Factor Aluminium Alloy 2024

Safety Factor Aluminium Alloy 3003

Besar kecilnya tegangan yang terjadi pada bingkai sangat mempengaruhi tingkat *safety factor*.

$$\eta = \frac{41,361 \text{ N/mm}^2}{13,646 \text{ N/mm}^2} = 3,03 \dots\dots\dots(4)$$

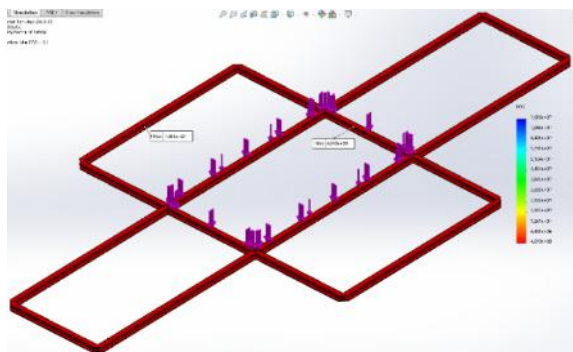


Gambar 12 Safety Factor Aluminium Alloy 3003

Safety Factor Aluminium Alloy 6061

Besar kecilnya tegangan yang terjadi pada bingkai sangat mempengaruhi tingkat *safety factor*.

$$\eta = \frac{55,148 \text{ N/mm}^2}{13,646 \text{ N/mm}^2} = 4,04 \dots\dots\dots(5)$$



Gambar 13 Safety Factor Aluminium Alloy 6061

Rekapitulasi Data Hasil Simulasi Statik Dengan Perbedaan Material

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Statik

	Alumin ium Alloy 1350	Alumin ium Alloy 2024	Alumin ium Alloy 3003	Alumin ium Alloy 6061
<i>Von mises Stress (N/mm²)</i>	Max: 13,646 Min: 0	Max: 13,617 Min: 0	Max: 13,646 Min: 0	Max: 13,646 Min: 0
<i>Displace ment (mm)</i>	Max: 0,036 Min: 0	Max: 0,034 Min: 0	Max: 0,036 Min: 0	Max: 0,036 Min: 0
<i>Safety Factor</i>	2,02	5,57	3,03	4,04

Setelah kita melihat dan mengetahui rubrik pemasangan, kita dapat membaca dan mengetahui kategori yang dihasilkan dalam rubrik pemasangan tersebut.

KESIMPULAN

Dari hasil penulisan ini, penulis dapat menarik beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Rancangan bingkai panel surya yang telah dirancang dan didesain untuk dapat menggantikan fungsi atap bangunan, mudah dalam pemasangan, serta kuat terhadap tekanan yang diberikan.
2. Berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data perbandingan nilai antara *von mises stress*, *displacement*, dan *safety factor*. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa pada material Aluminium Alloy 2024 sangatlah aman untuk digunakan sebagai material bingkai panel surya. Dikarenakan pada material ini memiliki *safety*

factor tertinggi dibandingkan dengan 3 material lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rozik Muhammad Ainur. 2019. Perancangan Dan Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pengayak Pasir Menggunakan Autodesk Inventor 2019. Teknologi Manufaktur, Fakultas Vokasi: Universitas 17 Agustus 1945.
- [2] Salafuddin Hafidz. 2016. Desain Dan Analisis Kekuatan Pada Rangka Kendaraan Jenis Prototypr Sesuai Standar Shell Eco Marathon Asia. Skripsi, Teknik Mesin: Universitas Negeri Jakarta.
- [3] Lucia V. Mercaldo, Paola Delli Veneri. 2020. Silicon Solar Cells: Materials, Technologies, Architectures (2th Ed). Italy, Portici: Italian National Agency For New Technologies, Energy And Sustainable Economic Development (Enea), Portici Research Centre.
- [4] Sri Yusmiati, Erlita. 2014. Energy Supply Solar Cell Pada Sistem Pengendali Portal Parkir Otomatis Berbasis Mikrokontroler At89s52. Other Thesis, Politeknik Negeri Sriwijaya.
- [5] Purwoto, Hari Bambang Dkk. 2018. Efisiensi Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [6] Alfari, Muhammad Fajri. 2017. Analisa Kebutuhan Daya Pada Robot Line Follower Dengan Sel Surya. Other Thesis, Politeknik Negeri Sriwijaya.
- [7] Khurmi Rs Gupta, Jk. 2005. Text Book Of Machine Design Eurasia, Publising House, Ltd Ram Nagar, New Delhi.
- [8] Ardiansyah, Moch. 2018. Analisa Hasil Pengecoran Aluminium Dengan Variasi Media Pendingin Dan Suhu Media Pendingin. Undergraduate Thesis, Universitas 17 Agustus 1945.
- [9] Setyaji, Erwan Fajar dan Dr. Sulardjaka St, Mt., Sulardjaka. 2012. Pengaruh Temperatur Tuang Stir Casting Terhadap Densitas, Porositas, Konduktivitas Termal Dan Struktur Mikro Pada Komposit Alumunium Yang Diperkuat Serbuk Besi. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering Department, Faculty Engineering Of Diponegoro University.

- [10] Laboratorium Teknik Mesin Lanjut (Material Teknik Dan Pengecoran Logam). 2018. Modul Praktikum Material Teknik, Depok: Universitas Gunadarma.
- [11] Salimin, Zainus dkk. 2015. "Fenomena Biosorpsi Kromium, Tembaga, Besi, dan Zink pada Extracellular Polymeric Substance Terdispersi Dalam Larutan". Tangerang: Puspitek Serpong.
- [12] Agustian, Syahrul Dan Saputra, Satria Fajar. 2018. Analisa Pengaruh Putaran Blade Dan Arah Sudut Serang Terhadap Koefisien Drag Dan Lift Pada Model Prototype Airfoil Naca 0012 Dengan Menggunakan Alat Uji Wind Tunnel Open Circuit Untuk Sarana Laboratorium Fluida. Undergraduate Thesis, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
- [13] Fatimah, Siti Nur. 2021. Capstone Design: Analisis Beban Statis Pada Rangka Mesin Pengereng Ikan Asin Dengan Software Solidworks 2018. Depok: Universitas Gunadarma.
- [14] Halim, Magdalena. 2016. Penilaian Pembelajaran Melalui Rubrik. Jakarta: Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya.
- [15] Tata Surdia Dan Shinroku Saito, Pengetahuan Bahan Teknik, Cetakan Kelima, Pt. Pradnya Paramita, Jakarta, 2005.

PENERAPAN *INTERNET OF THINGS* APLIKASI *BLYNK* PADA ALAT BANTU PRAKTIKUM FISIKA HUKUM HOOKE

Safira Adelia Putri¹, Dwi Arnoldi², Adian Aristia Anas³, Syamsul Rizal⁴, Ahmad Zamheri⁵, Ali Medi⁶, Rachmat Dwi Sampurno⁷

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139, Indonesia

adian1087@gmail.com¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan alat bantu praktikum Fisika Hukum Hooke yang terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) menggunakan *platform Blynk*. Alat ini dirancang untuk mengatasi permasalahan dalam kegiatan praktikum konvensional, seperti ketidakakuratan pengukuran manual, keterbatasan alat, dan kurangnya efisiensi dalam pemantauan data secara *real-time*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga variasi massa 0,2 kg, 0,25 kg, dan 0,3 kg serta tiga diameter pegas 1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm. Data diperoleh melalui dua metode, yaitu pengukuran manual dan pengukuran otomatis berbasis IoT. Hasil menunjukkan bahwa alat bantu praktikum berbasis IoT mampu menampilkan data secara akurat dan *real-time*, serta memiliki tingkat ketelitian yang tinggi dengan rata-rata ketelitian mencapai di atas 95%. Analisis statistik dengan ANOVA menunjukkan bahwa variabel massa dan diameter pegas berpengaruh signifikan terhadap nilai konstanta pegas ($p < 0,05$). Dengan demikian, alat bantu praktikum berbasis IoT ini dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kemudahan pemantauan praktikum Hukum Hooke, serta memberikan alternatif pembelajaran fisika yang interaktif bagi mahasiswa.

Kata kunci : hukum hooke, internet of things, blynk, anova.

Abstract

This research aims to design and develop a physics laboratory tool for Hooke's Law experiments integrated with Internet of Things (IoT) technology using the Blynk platform. The tool is designed to address issues commonly found in conventional laboratory practices, such as inaccurate manual measurements, limited equipment availability, and inefficient real-time data monitoring. Testing was conducted using three different masses (0.2 kg, 0.25 kg, and 0.3 kg) and three spring diameters (1 cm, 1.5 cm, and 2 cm). Data were collected using both manual measurements and automated IoT-based readings. The results indicate that the IoT-based laboratory tool provides accurate, real-time data with a high level of precision, achieving an average accuracy rate above 95%. Statistical analysis using ANOVA shows that both mass and spring diameter significantly affect the spring constant values ($p < 0.05$). Therefore, the IoT-based Hooke's Law experimental tool proves to be effective in enhancing the efficiency, accuracy, and accessibility of physics experiments. It offers a modern and interactive alternative for students to engage in physics laboratory activities.

Keywords : hooke's law, internet of things, blynk, anova.

PENDAHULUAN

Laboratorium Fisika di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya saat ini tengah mengembangkan peralatan penunjang kegiatan praktikum. Upaya ini dilakukan untuk mendukung mata kuliah Fisika Dasar yang memiliki 2 SKS, terdiri dari 1 SKS teori dan 1 SKS praktikum. Melalui kegiatan praktikum, mahasiswa diberikan

kesempatan untuk terlibat secara langsung dalam melakukan eksperimen guna memperkuat pemahaman terhadap konsep-konsep Fisika. Fisika sendiri merupakan salah satu cabang dari ilmu pengetahuan alam (IPA) atau sains yang memiliki peran penting dalam mendukung perkembangan dan kemajuan teknologi suatu bangsa [1]. Salah satu materi dalam Fisika dasar yang umum dipelajari melalui praktikum adalah Hukum Hooke. Hukum ini, yang diperkenalkan oleh Robert Hooke, menjelaskan hubungan antara gaya yang diberikan

pada suatu benda elastis, seperti pegas, dengan kemampuannya untuk kembali ke bentuk semula [2]. Konstanta pegas adalah ukuran gaya yang diperlukan atau yang harus diterapkan agar terjadi perubahan panjang. Dalam Sistem Satuan Internasional (SI), satuan untuk konstanta pegas adalah N/m atau $kg\ m/s^2$. Gaya pemulihan yang dihasilkan oleh pegas ditentukan melalui Hukum Hooke [3]. Dalam pelaksanaan praktikum Hukum Hooke secara konvensional, mahasiswa sering kali menghadapi kendala dalam pengukuran manual yang tidak akurat, Kendala dalam peralatan, ditambah dengan tantangan untuk mencatat dan menganalisis data secara langsung. Hal ini mengindikasikan perlunya inovasi dalam metode dan alat bantu praktikum.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) sudah banyak dibicarakan, banyak orang masih belum memiliki pemahaman yang mendalam, dan sampai saat ini belum terdapat standar yang disepakati. *Internet of Things* (IoT) adalah sebuah sistem yang terintegrasi untuk memperbaiki penggunaan koneksi *internet* yang selalu aktif. Kemampuan ini mencakup pertukaran data, pengendalian dari jarak jauh, dan fungsi – fungsi lainnya [4]. Salah satu aplikasi IoT yang bisa digunakan dalam praktikum ini ialah *Blynk*. *Blynk* merupakan sebuah aplikasi yang dapat diakses di platform iOS dan Android, dengan fungsi sebagai pengontrol perangkat seperti *Arduino*, *NodeMCU*, dan *Raspberry Pi* melalui koneksi *internet*. Dengan aplikasi ini, pengguna bisa mengelola perangkat keras, menampilkan data dari sensor, menyimpan informasi, serta melakukan visualisasi dan berbagai fungsi lainnya. [5]. Jadi penerapan IoT sangat bergantung pada pengembang serta perangkat lunak yang digunakan [6]. Oleh karena itu, IoT memungkinkan perangkat untuk bekerja secara mandiri atau memberikan perintah kepada perangkat lain. Hal ini memberikan fleksibilitas dan otomatisasi dalam kegiatan sehari-hari [7].

Penelitian ini merancang sebuah alat bantu praktikum Hukum Hooke dihubungkan dengan teknologi IoT melalui penggunaan sensor ultrasonik HC-SR04, mikrokontroler Arduino Uno R3, serta modul ESP32 yang mengirimkan data ke aplikasi *Blynk*. ESP32 digunakan secara langsung dalam pengembangan perangkat berbasis *Internet of Things*, tanpa memerlukan modul tambahan [8]. Sensor ultrasonik bekerja berdasarkan prinsip pantulan gelombang suara dan digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek yang berada di hadapannya [9]. Dalam penelitian ini sensor ultrasonik sangat dibutuhkan untuk mengukur pertambahan panjang pegas, sedangkan data hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* baik melalui LCD maupun aplikasi *Blynk*. Inovasi ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi pengukuran,

efisiensi praktikum, serta pengalaman belajar mahasiswa.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap alat dengan tiga variasi massa (0,2 kg, 0,25 kg, dan 0,3 kg) serta tiga diameter pegas (1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm). Data diperoleh dari dua metode yaitu manual dan berbasis IoT. Dengan uji Anova (*analysis of variance*) satu arah sebagai Analisis data. ANOVA adalah analisis data statistik yang dirancang sebagai metode dan membandingkan rata-rata dari berbagai kelompok data pada waktu yang sama. Analisis ini bertujuan untuk menentukan apakah perbedaan yang teramati dalam data disebabkan oleh faktor-faktor tertentu yang sedang diuj seperti perlakuan atau kelompok eksperimen atau hanya merupakan hasil dari variasi acak [10].

Pada penelitian yang dilakukan oleh [11] Wulandari menghasilkan nilai konstanta pegas rata-rata sebesar 59,86 N/m menggunakan sensor ultrasonik dan mikrokontroler Arduino. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja sesuai Hukum Hooke, namun masih dilakukan secara lokal tanpa pemantauan data *real-time*. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh [12] mengembangkan alat peraga gerak harmonik sederhana berbasis Arduino dengan nilai konstanta pegas 5,21 N/m dan kesalahan relatif 4,41%. Penelitian ini menitikberatkan pada akurasi pengukuran periode dan frekuensi, tetapi belum menerapkan IoT untuk pemantauan data *real-time*.

Berdasarkan temuan dari beberapa penelitian sebelumnya, alat praktikum fisika yang masih bersifat manual sering menghadapi berbagai kendala, seperti kurangnya efisiensi dalam pengukuran dan kesulitan dalam pemantauan data secara *real-time*. Selain itu, penggunaan metode manual juga berisiko menimbulkan kesalahan pembacaan data akibat faktor manusia. Untuk menjawab permasalahan tersebut, dilakukan penelitian dan perancangan alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan sistem kontrol digital. Alat ini dirancang agar mampu mengukur serta mengirimkan data perubahan panjang pegas secara otomatis ke aplikasi *Blynk*. Dengan bantuan alat praktikum berbasis IoT, mampu mengukur dan mengirimkan data serta perubahan panjang pegas secara otomatis ke aplikasi *Blynk*. Hal ini memungkinkan mahasiswa untuk memantau secara *real-time* melalui *smartphone* dan menyimpan data dengan lebih sistematis. Inovasi ini lebih maju karena mengintegrasikan IoT dan aplikasi *Blynk*, yang secara eksplisit mengatasi masalah kurangnya efisiensi dalam pemantauan data secara *real-time* pada praktikum konvensional. Sebagai pembanding dari penelitian terdahulu, hasil penelitian yang dilakukan oleh [13] masih pada tahap dasar mikrokontroler (*Arduino*), sedangkan hasil penelitian yang dilakukan oleh [14] adalah

analisis konseptual hanya terbatas pada metode konvensional tanpa pengukuran otomatis menggunakan mikrokontroler.

METODE PENELITIAN

Pembuatan alat praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things* ini dilaksanakan di bengkel *Maintenance and Repair* Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya. Dengan rencana pelaksanaan selama 4 (empat) bulan, dimulai dari bulan Maret 2025 sampai dengan Juli 2025. Menggunakan metode pengolahan data kuantitatif eksperimen dengan melihat perbandingan pada setiap sampel ditampilkan atau dimunculkan dalam bentuk grafik. Hasil pengambilan data eksperimen akan diolah dan di analisa untuk mengetahui kinerja alat atau tingkat ketelitian hasil perancangan alat praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things*.

1. Alat dan Bahan

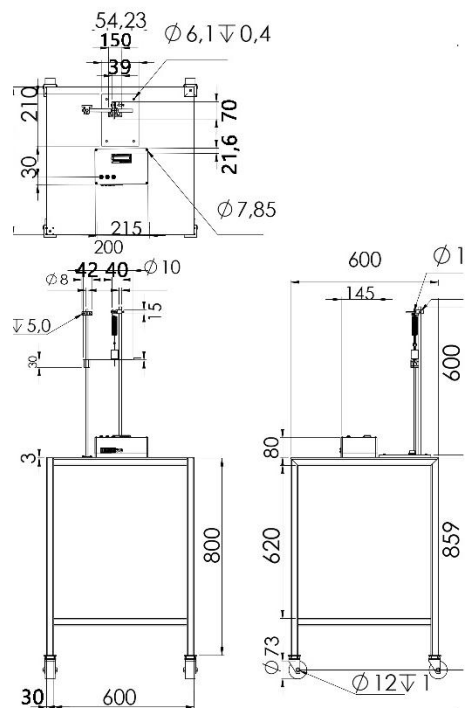
Adapun Alat dan Bahan yang di perlukan untuk pengujian alat praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things* ini sebagai berikut:

Tabel 1 Alat dan Bahan

Alat	Bahan
Arduino R3	Pegas
Modul Wifi NodeMCU ESP32	Massa
Sensor Ultrasonik HC- SR04	Mistar
Smartphone	Batang Statif

2. Perancangan Alat

Dalam perencanaan pada alat ini, adapun langkah – langkah yang penting yaitu merancang desain dan prinsip kerja alat tersebut. Hal ini dapat mempermudah pemahaman mengenai cara kerja dan fungsi dari alat yang akan dibuat. Berikut merupakan desain 3D dan 2D dari alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things*.



Gambar 1 Desain Alat Praktikum Hukum Hooke Berbasis IoT

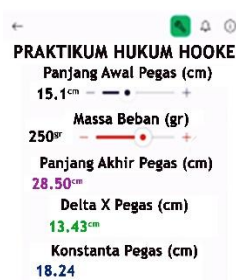
Desain alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis IoT dibuat menggunakan *Solidwork 2022* seperti tampak pada gambar di atas. Rancangan ini terdiri dari beberapa komponen utama dengan fungsi masing-masing. Holder *bracket* digunakan untuk membantu pengukuran gaya dan perubahan panjang pegas, sedangkan klem berfungsi menghubungkan batang statif dengan benda uji. Bearing *slide* blok memudahkan pengaturan tinggi penyangga sesuai panjang pegas. Pegas menjadi objek uji, dan beban berfungsi memberikan gaya tarik. Penyangga akrilik digunakan untuk pengukuran manual, sementara sensor ultrasonik mengukur panjang pegas secara otomatis. Seluruh komponen dipasang di atas meja besi hollow berukuran 60 x 60 cm yang dilengkapi roda agar mudah dipindahkan. Pada bagian elektroniknya meliputi ESP32 sebagai prosesor utama yang terhubung ke aplikasi *Blynk*, Arduino Uno sebagai pengendali sistem, LCD sebagai tampilan hasil pengukuran, serta *push button*, socket DC, dan saklar *on/off* sebagai kontrol *input*. Semua komponen listrik ditempatkan di box elektrikal agar rapi dan aman.

3. Sistem Kerja Alat

Sistem kerja alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things* (IoT) ini dimulai ketika sensor ultrasonik HC-SR04 mengukur jarak atau perubahan panjang pegas setelah diberi massa beban. Data hasil pengukuran tersebut dikirim ke mikrokontroler Arduino Uno R3 untuk dihitung nilai

pertambahan panjang (Δx), kemudian digunakan untuk menentukan nilai konstanta pegas (k) dengan rumus Hukum Hooke.

Hasil perhitungan ini selanjutnya dikirim melalui modul WiFi ESP32 ke aplikasi *Blynk* yang terpasang pada smartphone Android, sehingga pengguna dapat memantau data secara *real-time*. Selain melalui aplikasi *Blynk*, informasi mengenai perubahan panjang dan konstanta pegas juga ditunjukkan pada LCD 16x2 yang dipasang pada alat sebagai tampilan lokal. Dengan demikian, alat ini memungkinkan pengguna untuk melakukan pengukuran dan pemantauan praktikum secara akurat, efisien, dan modern, baik secara langsung maupun jarak jauh melalui perangkat mobile.



Gambar 2 Tampilan Data Hasil Percobaan Praktikum Hukum Hooke Di Aplikasi *Blynk*

4. Analisa Data

Saat sebuah pegas mengalami tarikan atau tekanan (dalam kondisi pemakaian) pegas tersebut akan mengalami perpanjangan atau mungkin penyusutan. Namun bila pegas ditarik melebihi batas tertentu maka benda itu tidak akan elastis lagi [15]. Nilai ini dipengaruhi oleh karakteristik fisik pegas, seperti jenis material, diameter kawat, jumlah lilitan, dan ukuran pegas. Penentuan nilai k dapat dilakukan secara eksperimental melalui dua metode, yaitu metode statis (dengan mengukur pertambahan panjang akibat beban tertentu) dan metode dinamis (dengan menganalisis periode getaran pegas dalam sistem osilasi). Oleh karena itu, nilai konstanta pegas dapat dihitung menggunakan persamaan (1) dan persamaan (2) berikut:

$$k = \frac{F}{\Delta X} = \frac{m \cdot g}{\Delta X} \dots\dots\dots(1)$$

Mencari rumus pertambahan Panjang (ΔX) sebagai berikut :

$$\Delta X = X_2 - X_1 \dots\dots\dots(2)$$

keterangan:

- k = Nilai Konstanta Pegas (N/m)
- F = Gaya yang diberikan ke Pegas (N)
- g = Gravitasi bumi, 9,81 m/s²
- m = Massa benda (kg)
- X_2 = Panjang akhir pegas (m)

X_1 = Panjang mula – mula pegas (m)
 ΔX = Pertambahan panjang pegas dari posisi normalnya (m)

Penentuan variabel dependen (konstanta pegas) dan perhitungan variabel independen dilakukan dengan 2 metode, yaitu metode manual (konvensional) di kertas berdasarkan pengukuran pertambahan panjang pegas dan konstanta pegas dan metode digital berbasis IoT yang ditampilkan di aplikasi *Blynk*. Hasil dari kedua perlakuan ini akan dianalisa tingkat ketelitian alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis IoT dan selanjutnya dijelaskan dengan menggunakan kriteria interpretasi persentase [16]. Tabel 2 menunjukkan kriteria persentase yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2 Kriteria Presentase

No.	Persentase	Klasifikasi
1	0% - 20%	Sangat tidak layak
2	21% - 40%	Tidak layak/tidak baik
3	41% - 60%	Cukup layak/cukup baik
4	61% - 80%	Layak/baik
5	81% - 100%	Sangat layak/sangat baik

Pengujian terhadap error juga sangat penting dilakukan saat pengambilan data, dengan tujuan untuk memastikan kelayakan alat yang digunakan pada alat praktikum Hukum Hooke. Persentase *error* hasil perhitungan kecepatan akhir benda uji pada sistem IoT di analisa dengan menggunakan rumus sebagai persamaan (3) berikut ini:

$$\%Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{man} - D_{IoT}}{D_{man}}\right)^2}{n}} \times 100\% \dots (3)$$

keterangan:

- $\%Error$ = persentase *error* alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT
- D_{man} = data perhitungan konstanta pegas (k) dari hasil pengujian manual
- D_{IoT} = data perhitungan konstanta pegas (k) dari hasil pengujian dengan IoT
- n = jumlah data konstanta pegas (k) yang diambil

Berikutnya, Tingkat Ketelitian (TK) alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT di analisa dengan menggunakan persamaan (4) di bawah ini:

$$TK = 100\% - \%Error \dots\dots\dots(4)$$

keterangan:

- TK = Tingkat Ketelitian alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT (satuan %)

Pengujian kedua variabel juga diperlukan untuk mengetahui dan membuktikan pengaruh dari variabel inde penden, massa benda yaitu (X_1) dan diameter pegas (X_2), serta variabel dependen (Y),

yaitu konstanta pegas. Nilai dari F_{hitung} dapat diperoleh dari hasil ANOVA. Sedangkan untuk nilai F_{tabel} didapatkan dari tabel distribusi F dengan signifikansi dengan rumus sebagai persamaan (5) dan persamaan (6) berikut:

$$F_{tabel} = df(N_1) \dots \dots \dots (5)$$

$$df_2 = n - k - 1 \dots \dots \dots (6)$$

keterangan:

- n = jumlah data
- k = jumlah variabel independen.

Hipotesa dalam penelitian ini antara lain:

1. Apabila nilai signifikansi $< \alpha = 0,05$ atau $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka dinyatakan variabel independen (X) dianggap memiliki pengaruh secara simultan terhadap variabel dependen (Y), sehingga H_0 ditolak dan H_1 diterima.
2. Apabila nilai signifikansi $> \alpha = 0,05$ atau $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka dinyatakan variabel independen (X) tidak memiliki dampak secara simultan pada variabel dependen (Y), sehingga H_0 diterima dan H_1 ditolak.

Selanjutnya, untuk mengukur seberapa besar dampak variabel independen secara simultan terhadap variabel dependen, maka diperlukan uji koefisien determinasi R^2 (R^2) yang berkisar dari 0 sampai 1. Pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen dapat dinyatakan kuat apabila Nilai $R^2 > 0,5$ [17].

Tabel 3 Koefisien Korelasi

No.	Koefisien Korelasi	Klasifikasi Korelasi
1	0,00 – 0,199	Sangat rendah
2	0,20 – 0,399	Rendah
3	0,40 – 0,599	Sedang
4	0,60 – 0,799	Kuat
5	0,80 – 1,000	Sangat kuat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa Tingkat Ketelitian Alat Praktikum Hukum Hooke Berbasis IoT

Pada pengujian menggunakan alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT ini, data hasil pengujian berupa pertambahan panjang pegas dan konstanta pegas langsung akan tampil secara online melalui aplikasi *Blynk* di seluler pintar dan *offline* di LCD 16x02 12IC. Di dalam sistem IoT, data pengujian tersebut dihitung melalui baris coding yang sudah diprogram/ditanam di dalam perangkat keras NodeMCU ESP32 berdasarkan data yang dibaca oleh sensor ultrasonik HC-SR04. Sedangkan

untuk sistem manual, pertambahan panjang pegas diukur menggunakan mistar.

Tingkat ketelitian alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT dianalisa dengan membandingkan konstanta pegas manual dan IoT dengan pers. (3) dan (4). Variabel independen yang dipakai adalah massa benda dan diameter pegas. Sedangkan, variabel dependen yang di analisa adalah konstanta pegas. Variabel massa sebesar 0,2kg, 0,25 kg, dan 0,3kg dilakukan 3 kali percobaan atau pengulangan pada variabel diameter 1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm diambil lalu diambil rata-rata. Jika menggunakan tabel, maka penulisannya seperti pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Hasil Percobaan IoT dan Manual

Massa benda (kg)	Diameter pegas (cm)	Pertambahan panjang pegas, ΔL (cm)		Konstanta pegas, k (N/m)	
		Manual	IoT	Manual	IoT
0,2	1	0,081	0,083	24,20	23,67
		0,080	0,083	24,50	23,72
		0,081	0,083	24,20	23,67
	1,5	0,052	0,052	37,69	37,98
		0,052	0,052	37,69	38,05
		0,053	0,052	36,98	38,05
2	0,067	0,069	29,25	28,53	
	0,067	0,069	29,25	28,44	
	0,068	0,069	28,82	28,44	
0,25	1	0,132	0,134	18,56	18,24
		0,132	0,134	18,56	18,22
		0,131	0,134	18,70	18,22
	1,5	0,066	0,064	37,12	38,16
		0,066	0,064	37,12	38,16
		0,065	0,064	37,69	38,28
2	0,099	0,100	24,75	24,62	
	0,098	0,100	25,00	24,54	
	0,099	0,100	24,75	24,54	
0,3	1	0,187	0,188	15,72	15,66
		0,187	0,188	15,72	15,66
		0,188	0,188	15,64	15,68
	1,5	0,077	0,077	38,18	38,23
		0,078	0,077	37,69	38,23
		0,078	0,077	37,69	38,33
2	0,126	0,127	23,33	23,11	
	0,126	0,127	23,33	23,07	
	0,125	0,127	23,52	23,07	

Tabel 5 Rata-Rata Hasil Percobaan IoT dan Manual

Masa benda (kg)	Diameter pegas (cm)	Pertambahan panjang pegas, ΔL (cm)		Konstanta pegas, k (N/m)	
		Manual	IoT	Manual	IoT
0,2	1	0,081	0,083	24,30	23,69
	1,5	0,052	0,052	37,46	38,03
	2	0,067	0,069	29,11	28,47
0,25	1	0,132	0,134	18,61	18,23
	1,5	0,066	0,064	37,31	38,20
	2	0,099	0,100	24,83	24,57
0,3	1	0,187	0,188	15,69	15,67
	1,5	0,078	0,077	37,86	38,26
	2	0,126	0,127	23,40	23,09

Tabel 6 Tingkat Ketelitian Pengukuran Manual dan IoT

Masa benda (kg)	Diameter pegas (cm)	Error	Tingkat Ketelitian (TK)
0,2	1	2,54%	97,46%
	1,5	1,83%	98,17%
	2	2,27%	97,73%
0,25	1	2,04%	97,96%
	1,5	2,46%	97,54%
	2	1,18%	98,82%
0,3	1	0,34%	99,66%
	1,5	1,28%	98,72%
	2	1,37%	98,63%
Rata-Rata		1,70%	98,30%

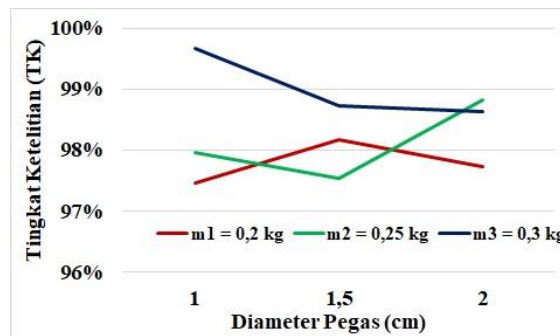
Tingkat ketelitian ini dihitung menggunakan rumus taraf ketelitian. Berikut ini merupakan contoh perhitungan untuk salah satu diameter pegas 1 cm masa benda 0,25 kg:

$$\begin{aligned}
 \%Error &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{man}-D_{IoT}}{D_{man}}\right)^2}{n}} \times 100\% \\
 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{18,56-18,243}{18,56}\right)^2 + \left(\frac{18,56-18,229}{18,56}\right)^2 + \left(\frac{18,70-18,229}{18,70}\right)^2}{3}} \times 100\% \\
 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n 0,00029172 + 0,00031805 + 0,00063439}{3}} \times 100\% \\
 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n 0,00124416}{3}} \times 100\% \\
 &= \sqrt{0,00041472} \times 100\% \\
 &= 0,0203646 \times 100\% \\
 &= 2,03\%
 \end{aligned}$$

$$TK = 100\% - \%Error$$

$$= 100\% - 2,04\%$$

$$= 97,96\%$$



Gambar 14 Grafik Tingkat Ketelitian

Berdasarkan Gambar 3 di atas, terlihat bahwa setiap variasi massa dan diameter pegas memberikan tingkat ketelitian yang cukup tinggi. Nilai Error yang muncul sangat kecil, yaitu antara 0,34% sampai 2,54%, dengan tingkat ketelitian yang mencapai 97% hingga 99%. Pada masa benda 0,2 kg, alat menunjukkan hasil paling akurat saat menggunakan pegas berdiameter 1,5 cm, dengan ketelitian sekitar 98%. Untuk masa benda 0,25 kg, ketelitian terbaik muncul pada diameter 2 cm, yaitu 98,82%. Sedangkan pada masa benda 0,3 kg, hasilnya paling akurat pada diameter 1 cm, dengan ketelitian tertinggi mencapai 99,66%. Secara keseluruhan, alat ini memiliki rata-rata ketelitian 98,30% dengan rata-rata error hanya 1,70%. Hasil ini membuktikan bahwa alat bantu praktikum yang dibuat sudah bekerja dengan sangat baik dan mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat. Dengan kata lain, alat ini sudah cukup andal untuk digunakan dalam pembelajaran praktikum Hukum Hooke.

Hasil Analisa Pengaruh Konstanta Pegas Terhadap Masa Benda dan Diameter Pegas

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Masa Benda (kg)	3	0,75	0,25	0,0025
Konstanta Pegas (N/cm)	9	1,727795	0,191977	0,001258838

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0,007574956	1	0,007575	5,026277663	0,04884353	4,964603
Within Groups	0,015070707	10	0,001507			
Total	0,022645662	11				

Gambar 15 Uji Anova pengaruh Masa Benda Terhadap Konstanta Pegas

Berdasarkan analisis varians satu faktor, terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik antara data massa benda, m (kg) dan konstanta pegas, k (N/cm). Hal ini terbukti karena Nilai P yang didapatkan ialah 0,04884, lebih kecil dari tingkat signifikansi umum 0,05. Selain itu, Nilai F_{Hitung} sebesar 5,026 juga melebihi Nilai F_{Tabel} sebesar 4,964, memperkuat kesimpulan bahwa perbedaan yang diamati di antara kedua kelompok data tersebut bukan sekadar kebetulan, melainkan perbedaan yang nyata, maka dinyatakan variabel massa benda (X_1) berpengaruh secara simultan terhadap variabel dependen (Y), sehingga H_0 ditolak dan H_1 diterima. Ini menunjukkan bahwa perubahan massa benda (dari 0.20, 0.25, hingga 0.30) secara signifikan mempengaruhi nilai konstanta pegas. Karena nilai Sig. (p -value = 0.048) lebih besar dari tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$, kita menolak hipotesis nol.

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Diameter pegas, (cm)	3	4,5	1,5	0,25
Konstanta Pegas (N/cm)	9	2,705967	0,300663	0,004

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	3,236421	1	3,236421	60,83502	0,000014693	4,964603
Within Groups	0,532	10	0,0532			
Total	3,76842	11				

Gambar 16 Uji Anova pengaruh Diameter Pegas Terhadap Konstanta Pegas.

Berdasarkan hasil analisis varians satu faktor (ANOVA) ini, terdapat perbedaan rata-rata yang sangat signifikan antara kelompok data Diameter Pegas (cm) dan Konstanta Pegas (N/cm). Perbedaan ini terbukti sangat kuat karena Nilai F Hitung kita mencapai angka yang sangat tinggi, yaitu 60,835, jauh melampaui Nilai F Kritis yang hanya 4,964. Lebih jauh lagi, Nilai P yang kita dapatkan adalah 0,000014693. Karena nilai P ini jauh lebih kecil dari ambang batas signifikansi umum 0,05, kita dapat menyimpulkan bahwa perbedaan rata-rata antara kedua kelompok data tersebut bukanlah suatu kebetulan acak, melainkan merupakan efek nyata yang sangat signifikan, maka dinyatakan variabel diameter pegas (X_2) terbukti secara bersamaan memengaruhi variabel dependen (Y), sehingga H_0 ditolak dan H_1 diterima. Dengan demikian, disimpulkan bahwa ada perbedaan yang sangat signifikan secara statistik dalam konstanta pegas antar kelompok diameter pegas yang berbeda. perubahan diameter pegas (dari 1.00, 1.50, hingga 2.00) secara signifikan mempengaruhi nilai konstanta pegas. Karena nilai Sig. (p -value = 0.000)

lebih besar dari tingkat signifikansi $\alpha=0.05$, kita menolak hipotesis nol.

Hasil analisis data yang dilakukan pada Gambar 4 dan Gambar 5, dapat disimpulkan bahwa alat praktikum Hukum Hooke berbasis IoT telah berhasil menerapkan prinsip - prinsip dasar dari Hukum Hooke. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa variabel massa (X_1) dan variabel diameter pegas (X_2) secara signifikan mempengaruhi nilai konstanta pegas (Y). Hal ini mendukung hipotesis bahwa massa dan jenis pegas mempengaruhi karakteristik elastis pegas. Data yang dihasilkan konsisten dengan Hukum hooke, bahwa gaya yang bekerja pada pegas berbanding lurus dengan perubahan Panjang pegas [16].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa alat bantu praktikum Hukum Hooke berbasis *Internet of Things* (IoT) ini berhasil dirancang dan dikembangkan untuk mengatasi masalah dalam praktikum konvensional seperti ketidakakuratan pengukuran manual, keterbatasan alat, dan kurangnya efisiensi pemantauan data secara *real-time*. Pengujian menunjukkan bahwa alat berbasis IoT ini mampu menampilkan data secara akurat dan *real-time*, dengan tingkat ketelitian rata-rata di atas 95%. Secara spesifik, tingkat ketelitian alat dalam mengukur konstanta pegas pada berbagai variasi massa dan diameter pegas berkisar antara 97,46% hingga 99,66%. Analisis statistik menggunakan ANOVA membuktikan bahwa variabel massa dan diameter pegas secara signifikan memengaruhi nilai konstanta pegas ($p < 0,05$). Hal ini mendukung prinsip dasar Hukum Hooke yang diterapkan pada alat ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Junaid, S. Salahudin, and R. Anggraini, "Pengaruh Model Pembelajaran Problem Based Learning terhadap Pemahaman Konsep IPA Siswa di SMPN 17 Tebo," *Physics and Science Education Journal (PSEJ)*, vol. 1, no. 1, p. 16, Apr. 2021, doi: 10.30631/psejv1i1.709.
- [2] P. Rahmadhani, "Analisis hubungan minat belajar dan hasil belajar materi Hukum Hooke di SMAN 10 Kota Jambi," *Journal Evaluation in Education (JEE)*, vol. 3, no. 2, pp. 45–48, 2022, doi: 10.37251/jeev3i2.242.
- [3] R. Refiantoro and Kurmiawanti, "Penentuan konstanta pegas dalam Hukum Hooke pada rangkaian tunggal, seri, dan paralel," *JIE.UPY*

- Journal of Industrial Engineering Universitas PGRI Yogyakarta, vol. 1, no. 2, pp. 1–1, 2022. Available: <https://journal.upy.ac.id/index.php/JIE/issue/view/214/76>.
- [4] F. Susanto, N. K. Prasiani, and P. Darmawan, "Implementasi Internet of Things dalam kehidupan sehari-hari," Jurnal Imagine, vol. 2, no. 1, pp. 35–40, 2022, doi: 10.35886/imaginev2i1.329.
- [5] R. Anjani, D. Adibah, and S. Danaryani, Rancang bangun alat training kit berbasis mikrokontroler dan IoT menggunakan aplikasi Blynk. Available: <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/14475/>, 2023.
- [6] A. D. Limantara, Y. C. S. Purnomo, and S. W. Mudjanarko, "Pemodelan sistem pelacakan lot parkir kosong berbasis sensor ultrasonic dan Internet of Things (IoT) pada lahan parkir di luar jalan," Seminar Nasional Sains dan Teknologi, vol. 1, no. 2, pp. 1–10, 2017. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek>.
- [7] A. Selay, G. D. Andgha, M. A. Alfarizi, M. I. Bintang, M. N. Falah, M. Khaira, and M. Encep, "Karimah Tauhid, Volume 1 Nomor 6 (2022), e-ISSN 2963-590X," Karimah Tauhid, vol. 1, no. 2963-590X, pp. 861–862, 2022. Available: <https://ojs.unida.info/karimahauid/article/view/7633/3570>.
- [8] A. Prafanto, E. Budiman, P. P. Widagdo, G. M. Putra, and R. Wardhana, "Pendeteksi Kehadiran menggunakan ESP32 untuk Sistem Pengunci Pintu Otomatis," JTT (Jurnal Teknologi Terapan), vol. 7, no. 1, p. 37, 2021. Available: <https://doi.org/10.31884/jtt.v7i1.318>.
- [9] B. Saragih and C. Bancin, "Perancangan Pengukur Jarak Secara Wirelees Menggunakan Sensor Gelombang Ultrasonik Berbasis Arduino UNO ATmega 328 Dengan Tampilan Di Laptop," Jurnal Teknologi Energi Uda, vol. 9, no. 2, pp. 74–80, 2020. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>.
- [10] Y. Nainggolan, Divia, D. L. Hutapea, W. F. Sirait, M. Sirait, and R. Sianturi, "Anava Satu Jalur (One Way – Anova)," INNOVATIVE: Journal of Social Science Research, vol. 5, no. 1, pp. 5670–5682, 2025. Available: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>.
- [11] C. P. Pratama and D. Wulandari, "Rancang Bangun Aplikasi Trainer Hukum Hooke Dengan Menggunakan Sensor Ultrasonic," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 6, no. 1, pp. 83–89, 2020. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin/article/view/37322/33122>.
- [12] M. Taneo, I. Boimau, and K. D. F. Mataubenu, "Rancang Bangun Alat Peraga Gerak Harmonik Sederhana Berbasis Arduino Pada Sistem Pegas," Jurnal Pendidikan Fisika, vol. 9, no. 2, p. 239, 2021. doi: 10.24127/jpf.v9i2.3739.
- [13] M. Masyruhan, U. Pratiwi, & Y. Al Hakim, "Perancangan alat peraga hukum Hooke berbasis mikrokontroler Arduino sebagai media pembelajaran fisika", SPEKTRA: Jurnal Kajian Pendidikan Sains, vol. 6, no. 2, 2020. Available: <https://doi.org/10.32699/spektra.v6i2.1234>.
- [14] D. M. Irawan, G. Iswanto, M. H. Furqon, S. Hastuti, "Pengaruh Nilai Konstanta Terhadap Pertambahan Panjang Pegas Pada Rangkaian Tunggal, Seri dan Paralel", Jurnal Teknik Mesin MERC (Mechanical Engineering Research Collection), vo. 1, no. 5, 2018. Available: <https://jom.untidar.ac.id/index.php/merc/article/view/125>.
- [15] D. M. Irawan, G. Iswanto, H. F. Muhammad, and H. Sri, "Pengaruh nilai konstanta terhadap pertambahan panjang pegas pada rangkaian tunggal, seri dan paralel," Jurnal Teknik Mesin MERC (Mechanical Engineering Research Collection), vol. 1, no. 5, p. 4, 2018. Available: <http://jom.untidar.ac.id/index.php/merc/article/view/125>.
- [16] Riduwan, Dasar-dasar Statistika, 17th ed. Bandung: Alfabeta, 2023.
- [17] A. Agustian, A. A. Anas, R. Wilza, and A. Junaidi, "Perancangan alat praktikum fisika gerak jatuh bebas," Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika dan Sains, vol. 5, no. 3, pp. 212–221, 2024. Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/machinery/article/view/10142/3444>.
- [18] M. Rizqi, D. Yulianawati, and Nurjali, "Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)," Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains, vol. 3, no. 2, pp. 43–47, 2020. Available: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v7i2.758>.

INVESTIGATION OF DORSAL FIN EFFECTS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF INVERTED-V EMPENNAGE VTOL UNMANNED AERIAL VEHICLE

Muhammad Agung Bramantya¹, Gesang Nugroho²

¹ Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281 Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

bramantya@ugm.ac.id¹

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are essential tools in precision agriculture, enabling real-time monitoring, improved land management, and more efficient resource use. Among them, Vertical Takeoff and Landing (VTOL) UAVs are ideal for operation in confined and uneven agricultural terrains. However, UAVs equipped with inverted-V empennages suffer from aerodynamic drawbacks including directional instability and adverse yaw under sideslip conditions. This study advances the state-of-the-art by optimizing the aerodynamic performance of inverted-V tail configurations through integration of a dorsal fin. Using Computational Fluid Dynamics (CFD), we assessed multiple dorsal fin designs on a UAV platform with a maximum takeoff weight of 10 kg, payload of 2 kg payload, 2-hour endurance, stall speed of 10 m/s, and operational range of 5 km². We analyzed key aerodynamic metrics—lift and drag coefficients, lift-to-drag ratio, and yaw moment coefficient—as well as flow behavior via pressure contours and vorticity plots. The results confirmed that sideslip angles degrade aerodynamic efficiency; however, a properly designed dorsal fin, particularly variation 2, significantly reduced adverse yaw at higher angles of attack and sideslip. This modification enhances UAV stability and flight performance, indicating a meaningful improvement in VTOL UAV design for agricultural applications.

Key words : aerodynamic, unmanned aerial vehicles, CFD, dorsal fin.

INTRODUCTION

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have undergone significant technological advancements in recent years, positioning them as invaluable tools across various industries, particularly precision agriculture [1]. Precision agriculture refers to the integration of advanced technologies such as UAVs to optimize farming practices, improve productivity, and reduce resource consumption [2]. UAVs have become central to modern agricultural practices owing to their capacity to provide real-time, high-resolution data. They enable farmers to monitor crop health, soil conditions, and overall field performance, facilitating data-driven decisions that enhance land management and operational efficiency [3]. UAVs offer substantial advantages over traditional methods, significantly reducing the time and labor required for field surveys, and enhancing the accuracy of the data collected. This capability is essential for both small- and large-scale agricultural operations, as it allows for more efficient resource management while optimizing crop yield and reducing environmental impacts [4].

Among the various UAV configurations, vertical takeoff and landing (VTOL) UAVs have emerged as particularly well suited for agricultural applications. VTOL UAVs can take off and land vertically, eliminating the need for long runways, making them ideal for deployment in rural and agricultural environments where the space for conventional takeoff and landing is limited [5]. The compact nature of VTOL UAVs also allows for easy transport and deployment, which is particularly advantageous in remote or difficult-to-reach areas where infrastructure may be inadequate. Despite these advantages, optimizing the performance of VTOL UAVs in demanding agricultural environments presents several challenges, particularly regarding the aerodynamic efficiency of the empennage configuration.

A common empennage configuration used in VTOL UAVs is an inverted-V design that provides stability and maneuverability during flight [6]. However, this configuration is not without its aerodynamic challenges. In particular, inverted-V empennage can experience aerodynamic instability, particularly at higher sideslip angles, which occur frequently during turns or in the presence of crosswinds [7]. These instability issues lead to adverse yaw moments, which can degrade the

control and stability of UAV, making it particularly difficult to maintain a steady flight during surveillance or data collection tasks in turbulent or gusty wind conditions [8].

To address these aerodynamic challenges, this study explored the integration of a dorsal fin into an inverted V-shaped empennage configuration. The dorsal fin serves as an additional aerodynamic surface that enhances the stability of the UAV by reducing the adverse effects of sideslip angle and yaw moment [9]. Previous research has demonstrated that such modifications can improve the control of a UAV over its aerodynamic characteristics, particularly in the domains of lateral and directional stability, where yaw instability is the most problematic [10]. By increasing the effectiveness of the empennage, the dorsal fin improves the overall UAV performance, making it more suitable for precision agriculture missions.

The methodology employed in this study relies heavily on Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, which allow for detailed evaluation of various dorsal fin configurations and their impact on UAV performance. These simulations analyzed key aerodynamic parameters, including the lift and drag coefficients, lift-to-drag ratios, and yaw moments, under varying operational conditions [11]. Furthermore, this study investigated the airflow patterns within the UAV system, including the pressure contours and vorticity, to gain a deeper understanding of how the dorsal fin influences the overall aerodynamic behavior of the UAV.

The primary objective of this study was to enhance the performance of VTOL UAVs, particularly for precision agriculture applications, by optimizing the empennage design. By exploring various dorsal fin configurations, this study aimed to improve the lateral stability of VTOL UAVs, thus making them more reliable and efficient in agricultural settings [12]. The results of this study are expected to contribute significantly to the development of more stable UAV systems, further advancing UAV technology in precision agriculture. Ultimately, the findings of this study could support the broader adoption of UAV systems in agricultural practices, contributing to the technological advancement and sustainable growth of agriculture in Indonesia and globally [13].

METHODS

This section describes the methodology used to design and optimize UAV for precision

agricultural surveillance. This study primarily utilized Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations to evaluate the aerodynamic performance of dorsal fins integrated with an inverted V-empennage configuration. The design process began with the overall UAV configuration, specifically tailored for surveillance in agricultural environments, to ensure suitability for the limited space and operational requirements that are typical of such missions. First, key design parameters, including the size, weight, payload capacity, and mission endurance of the UAV, were established. The next step involves incorporating dorsal fins to improve lateral stability and reduce yaw moments, which are critical for maintaining control under high-sideslip conditions. CFD simulations were conducted using various dorsal fin designs to analyze their impact on aerodynamic parameters such as lift, drag, and yaw moment coefficients. This iterative approach allows for the refinement of both UAV design and dorsal fin configurations for optimal performance in precision agriculture applications.

This study used various tools to support the design process, data collection, and data analysis. Several software applications are used in this study.

- Microsoft Excel was used to organize and process numerical data.
- Autodesk Inventor 2024: 3D modeling and design of UAV geometry.
- ANSYS Design Modeler: Creation and refinement of aerodynamic design.
- ANSYS Mesh: Used to generate the computational grids essential for CFD simulations.
- ANSYS Fluent: Simulates the fluid dynamics around the UAV and analyzes its aerodynamic behavior.

This study involved conducting computational fluid dynamics (CFD) simulations on dorsal fins with an inverted V-shaped empennage. 3D models of the dorsal fins were developed using the approach described in the Aerodynamic Design Guidelines of Aircraft Dorsal Fin [8]. The dimensions of the dorsal fins used in this study are summarized in Table 1, which outlines the key parameters, including the vertical tail height (h_v), vertical tail area (S_v), dorsal fin area (S_{df}), sweep angle (ϕ_v), dorsal fin sweep angle (ϕ_{df}), and other geometric ratios, such as l_{df}/h_{df} , S_{df}/S_v , and ϕ_v/ϕ_{df} .

These variations provide a comprehensive framework for analyzing the aerodynamic impact of different dorsal fin designs, thereby enabling the optimization of UAV performance.

The independent variables in this study were the dorsal fins, which were designed with four-

dimensional variations and included parameters such as the height, length, sweep angle, and surface area. The dependent variable in this study was empennage configuration, specifically an inverted-V design. The control variables in this study included the Angle of Attack (AoA), sideslip angle, mesh size, and quality and size of the fluid domain used in the CFD simulations.

The 3D geometry of the UAV and dorsal fin was created using Autodesk Inventor CAD software. Simplifications are applied to the UAV geometry to reduce complexity during the meshing process. Four dorsal fin variations were developed, based on the independent variables established in this study.

Figure 1 shows the initial 3D model of the UAV, and Figure 2 shows a simplified model for meshing purposes. Additionally, Figures 3 (a) through (d) illustrate the four dorsal fin variations.

Table 1 Summary of geometry dorsal fin comparison

Para meters	Comparisons				Unit
	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	
Empennage Vertical Heigh (h_v)	0,270	0,270	0,270	0,270	m
Dorsal Fin Height, h_{df}	0,218	0,436	0,301	0,316	m
Empennage Vertical Area (S_v)	0,298	0,298	0,298	0,298	m ²
Dorsal Fin Area (S_{df})	0,094	0,179	0,179	0,094	m ²
Empennage Vertical Angle (ϕ_v)	22,21	22,21	22,21	22,21	deg
Dorsal Fin Angle (ϕ_{df})	77,1	66,4	77,1	66,4	deg
Empennage Vertical Length (l_{v-df})	0,038	0,072	0,038	0,072	m
Dorsal Fin Length (l_{df})	0,218	0,109	0,150	0,237	m
Empennage Vertical Root Chord ($C_{r,v}$)	0,300	0,300	0,300	0,300	m
Dorsal Fin Root Chord ($C_{r,df}$)	0,073	0,073	0,073	0,073	m
l_{v-df}/l_{df}	0,174	0,659	0,252	0,303	-
h_{df}/h_v	0,805	1,613	1,112	1,169	-
l_{df}/h_{df}	1	0,25	0,5	0,75	-
S_{df}/S_v	0,315	0,6	0,6	0,315	-
$l_{df}/C_{r,v}$	0,726	0,363	0,501	0,790	-
S_v/S_{df}	3,17	1,67	1,67	3,17	-
ϕ_v/ϕ_{df}	0,28	0,33	0,28	0,33	-

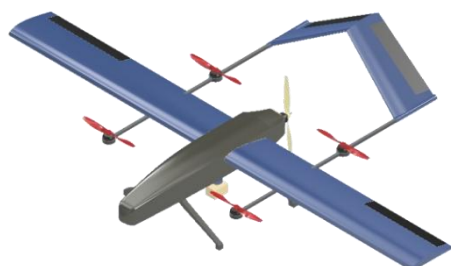


Figure 1 The initial 3D model of the UAV

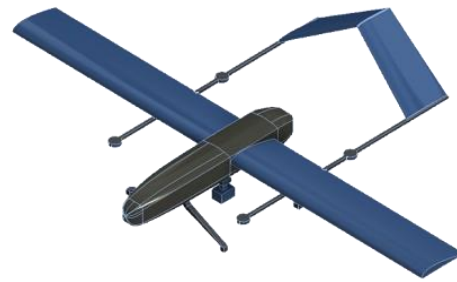
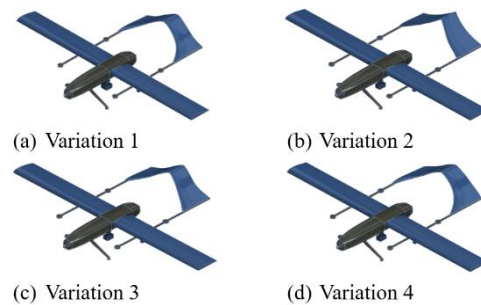


Figure 2 The simplified model for meshing purposes



Figures 3 Four dorsal fin variations

RESULTS AND DISCUSSION

1. Impact of Dorsal Fin on Inverted-V Empennage

The aerodynamic effects of adding a dorsal fin were analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, with a focus on lift, drag, and yaw moments derived from pressure contours and streamlines around the UAV. The pressure contours indicate that the pressure beneath the UAV was higher than that on its upper surface, indicating the generation of lift. As the angle of attack (AoA) increased, the lift also increased, accompanied by a higher drag, which reduced propulsion efficiency. Larger AoAs lead to airflow separation over the wings, potentially causing stall, a condition in which lift is lost at critical AoAs. Streamlines at low AoAs demonstrated a stable flow, whereas flow separation was observed at high AoAs.

Efficient UAV performance requires a balance between generating sufficient lift to maintain altitude and maneuverability, while minimizing drag. The L/D ratio (L/D) is a crucial performance indicator, as shown in Figure 4. At low AoAs (-9° to 5°), L/D remained stable across variations, suggesting a steady airflow around the wings and empennage. The maximum aerodynamic

efficiency was observed at AoAs between 9° and 12° , where the UAV generated high lift with minimal drag. Dorsal fin variation 1 achieved the highest L/D ratio at an AoA of 9° , exceeding 400, indicating an excellent aerodynamic efficiency. This variation effectively generated a significant lift with reduced drag. Figure 5 shows the airflow and vorticity for variations of 1.

At AoAs above 15° , the L/D ratios decreased for all variations owing to the increasing drag from the flow separation, which reduced the efficiency and led to stall. These results emphasize the importance of optimizing the dorsal fin design to improve the UAV aerodynamic performance, particularly in maintaining stability and efficiency under a high AoA.

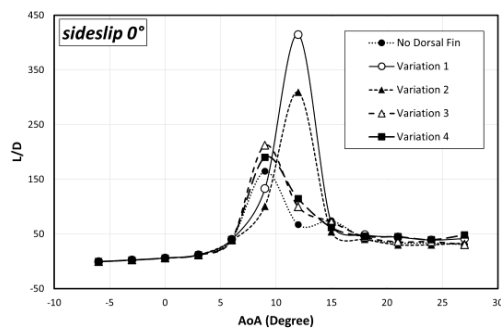


Figure 4 Graph of L/D vs AoA

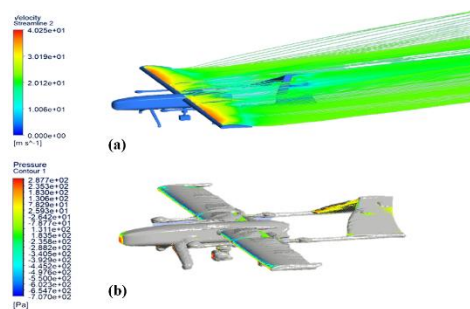


Figure 5 Phenomena in variation 1: (a) Airflow and (b) Vorticity

2. Analysis of the Effect of Sideslip Angle on the Dorsal Fin

This section provides a comprehensive analysis of the effects of sideslip angle on the aerodynamic performance and directional stability of a UAV equipped with an inverted V-shaped empennage. This study primarily examined several key aerodynamic parameters, including the coefficient of lift (C_L), coefficient of drag (C_D), lift-to-drag ratio (L/D), and coefficient of yawing moment (C_N), all of which are critical for assessing

the flight efficiency, stability, and overall aerodynamic performance of UAVs.

The coefficient of lift (C_L) measures the ability of a UAV to generate lift at different angles of attack (AoA). At a sideslip angle of 0° , when the airflow was aligned with the UAV's longitudinal axis, the pressure distribution was optimal and facilitated the maximum lift generation. The results indicated that under these conditions, all dorsal fin variations produced similar C_L values, with the UAV exhibiting a relatively high lift coefficient across the range of AoAs tested.

However, as the sideslip angle increased to 5° and 10° , the presence of dorsal fins began to have a more pronounced impact on the lift of the UAV. Specifically, the results suggest that at these sideslip angles, the lift coefficient (C_L) decreases in certain AoA ranges, particularly between the 5° and 10° sideslip. This reduction in C_L can be attributed to the lateral wind components, which decrease the effective angle of attack, and consequently, the overall lift generation capability. The aerodynamic efficiency of the UAV was compromised under these conditions owing to the reduced lift produced by the dorsal fin.

Interestingly, the impact of the dorsal fins on lift became more noticeable at higher AoAs (18° to 27°), where the presence of dorsal fins tended to increase C_L compared with the baseline condition (i.e., no dorsal fin present). This improvement can be attributed to the ability of the dorsal fins to mitigate the adverse effects of turbulent flow and enhance pressure recovery over the wing, thereby enhancing the lift generation at a higher AoA. Therefore, while dorsal fins may reduce lift under certain low AoA and sideslip conditions, they provide a beneficial effect in maintaining lift at a higher AoA, particularly in high-sideslip flight regimes.

The coefficient of drag (C_D) is a vital parameter for evaluating the resistance encountered by UAV during flight. A higher drag coefficient indicates increased resistance, which typically results in a reduced aerodynamic efficiency and higher fuel consumption. At a sideslip angle of 0° , the drag coefficients for all dorsal fin variations were similar, showing a general increase in drag as the AoA increased, as expected from typical aerodynamic behavior. This trend follows the established principles of aerodynamics, where a higher AoA leads to increased airflow separation, and consequently, a higher drag.

As the sideslip angle increased to 5° and 10° , an interesting trend emerged: the drag values for all dorsal fin variations decreased slightly compared to the 0° sideslip condition, indicating an

improvement in the aerodynamic performance under non-zero sideslip conditions. Particularly notable is Variation 4, which demonstrates the lowest drag across all AoA and sideslip configurations, particularly at a 10° sideslip. This suggests that Variation 4 offers the best drag reduction, likely because of its optimal design, which minimizes flow separation and enhances the aerodynamic efficiency of the UAV under higher sideslip conditions. These findings emphasize the importance of the dorsal fin configuration in optimizing drag characteristics, particularly for UAVs operating under conditions with significant sideslip.

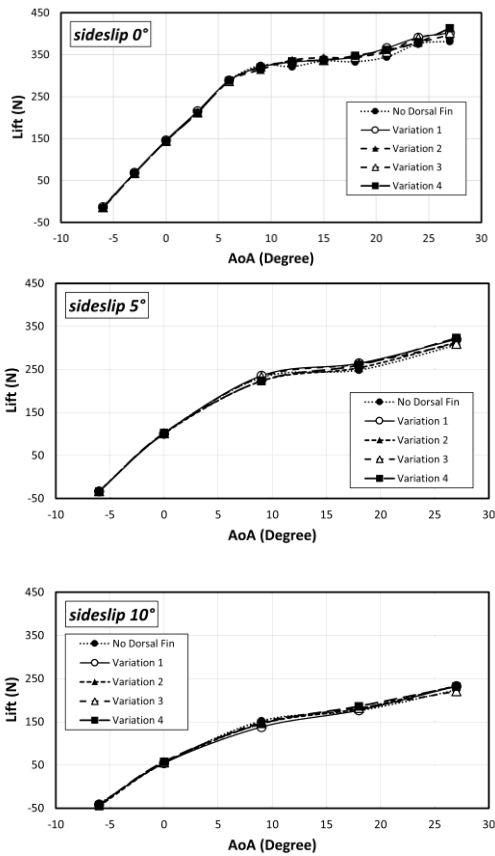


Figure 6 Graph of Lift versus AoA under the following conditions: *sideslip 0°*, *sideslip 5°*, and *sideslip 10°*.

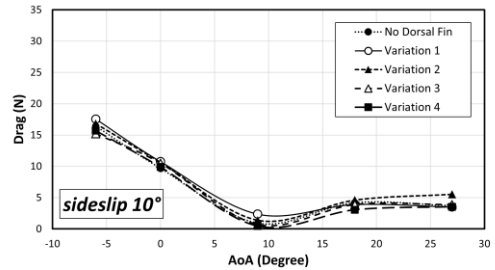
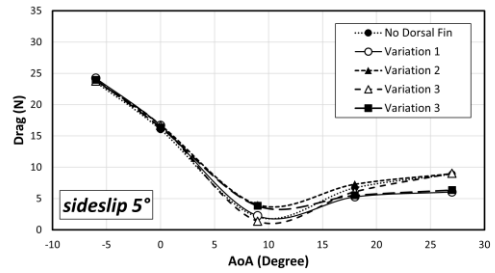
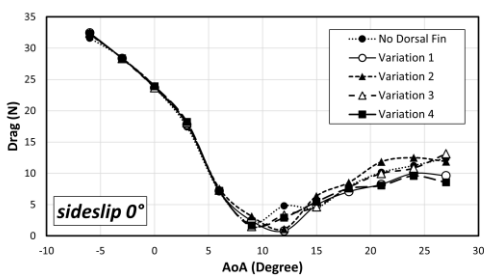
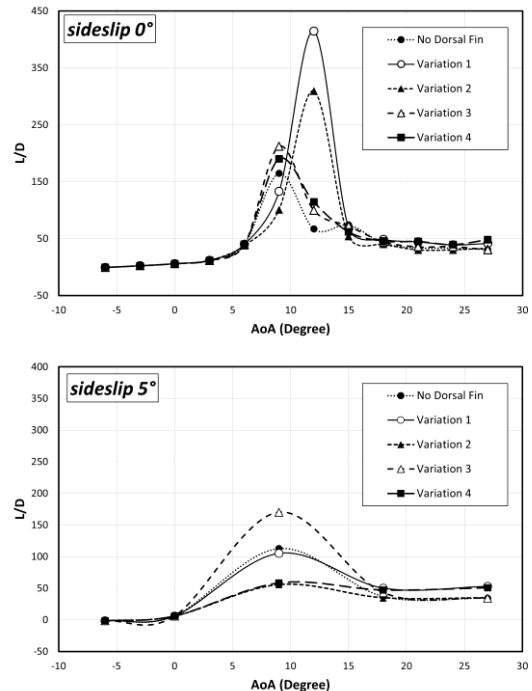


Figure 7 Graph of Drag versus AoA under the following conditions: *sideslip 0°*, *sideslip 5°*, and *sideslip 10°*



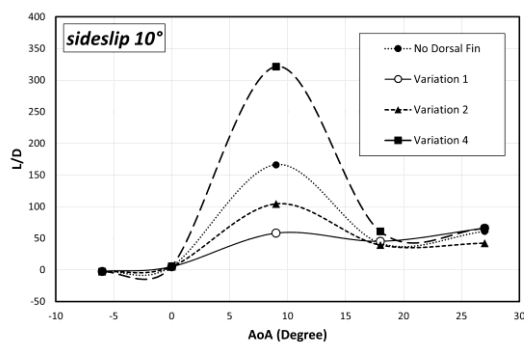


Figure 8 Graph of L/D vs. AoA under the following conditions: *sideslip 0°*, *sideslip 5°*, and *sideslip 10°*

The lift-to-drag ratio (L/D) is a key indicator of aerodynamic efficiency because it represents the ability to generate lift while minimizing drag. A higher L/D ratio is desirable for sustained flight efficiency because it enables a UAV to maintain lift with minimal drag. For a sideslip angle of 0°, Variation 1 exhibited the highest L/D ratio, suggesting that it had the best aerodynamic efficiency, particularly at a lower AoA. This trend is expected because higher C_L values coupled with moderate drag result in an optimal L/D ratio at low AoA.

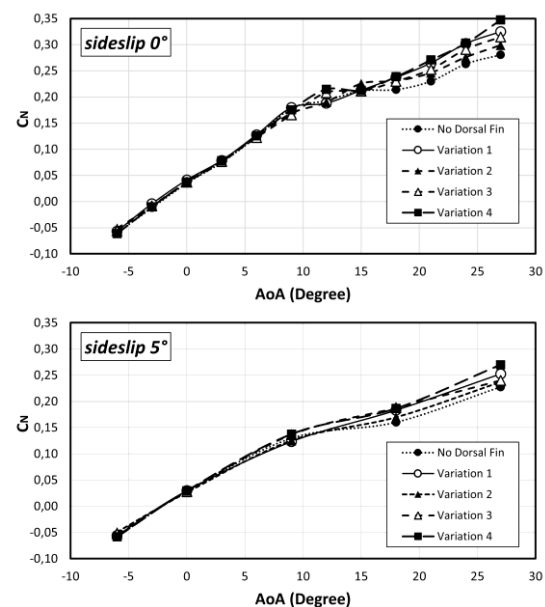
However, as the AoA increased and the UAV transitioned to higher-drag regimes, the L/D ratio decreased across all variations, reflecting the increased drag associated with a higher AoA. In this context, the L/D ratio for all variations decreased, as expected, because of the inherent aerodynamic losses associated with a higher AoA. Nevertheless, when the sideslip increased to 5° and 10°, the L/D ratio improved slightly for all variations, with Variation 4 performing best at a 10° sideslip. This suggests that Variation 4 offers the best overall aerodynamic efficiency under higher sideslip conditions, likely because of its ability to balance the effects of lift and drag, while minimizing the negative impact of lateral wind components on performance.

The coefficient of yawing moment (C_N) is a critical measure of the directional stability of a UAV, as it quantifies the yawing moment generated during flight, which is influenced by sideslip and AoA. At a sideslip angle of 0°, the C_N increased steadily with the AoA, exhibiting a nearly linear trend for all dorsal fin variations. This indicates that, as the AoA increases, the UAV experiences more yaw, which can lead to stability issues.

When the sideslip angle was increased to 5° and 10°, the presence of dorsal fins became more significant in reducing the yaw moment. In particular, Variation 2 showed the most promising

results in reducing yaw at a 5° sideslip, suggesting that the dorsal fin design in this variation effectively mitigated the yawing instability under these conditions. At a 10° sideslip, Variation 4 consistently provided better stability, demonstrating the increased effectiveness of the dorsal fins in enhancing directional stability at higher sideslip angles. These results highlight the role of dorsal fins in improving the ability of UAVs to maintain directional stability, particularly under conditions involving significant yaw and lateral-wind components.

The aerodynamic effects of adding a dorsal fin were analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, with a focus on lift, drag, and yaw moments derived from pressure contours and streamlines around the UAV. The pressure contours indicate that the pressure beneath the UAV was higher than that on its upper surface, indicating the generation of lift. As the angle of attack (AoA) increased, the lift also increased, accompanied by a higher drag, which reduced propulsion efficiency. Larger AoAs lead to airflow separation over the wings, potentially causing stall, a condition in which lift is lost at critical AoAs. Streamlines at low AoAs demonstrated a stable flow, whereas flow separation was observed at high AoAs.



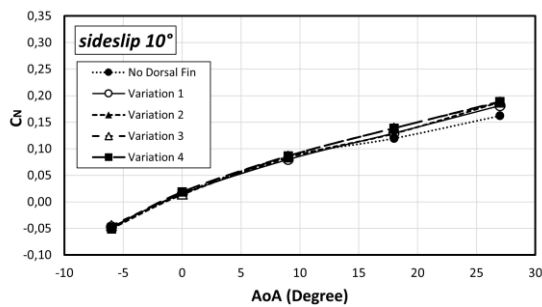


Figure 9 Graph of C_N vs. AoA under the following conditions: *sideslip* 0°, *sideslip* 5°, and *sideslip* 10°

CONCLUSION

Aerodynamic Performance at Optimal Angles of Attack (AoA). The simulation results demonstrated that the maximum lift-to-drag ratio was achieved at angles of attack (AoAs) between 9° and 12° when utilizing Variation 1 of the dorsal fin with the smallest dorsal fin height 0,218 m. This variation significantly enhances the aerodynamic efficiency of the UAV, producing a substantial lift force while minimizing the drag. This indicates that variation 1 is particularly effective in optimizing the overall aerodynamic performance of the UAV, contributing to better fuel efficiency and improved flight performance.

Impact of Sideslip Angle on UAV Stability. As the sideslip angle increased, the simulation revealed a corresponding decrease in key aerodynamic parameters, including the lift coefficient, drag coefficient, lift-to-drag ratio, and yaw moment. This suggests that UAV stability is adversely affected as the sideslip increases. Additionally, the dorsal fin configuration minimally influenced these parameters when the sideslip angle was 0° or at low AoA. This indicates that under these specific conditions, the dorsal fin does not substantially affect UAV performance.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude to all the parties who supported the completion of this research, especially Kelvin Kurniawan and Hendra Faisal, as assistant researchers. This research was funded by the Faculty of Engineering, Gadjah Mada University (Grant No. 1610402/UN1). FTK/SK/HK/2025).

REFERENCES

- [1] Y. A. Abd Rahman, M. T. Hajibeigy, A. S. M. Al-Obaidi, and K. H. Cheah, "Design and Fabrication of Small Vertical-Take-Off-Landing Unmanned Aerial Vehicle," *MATEC Web Conf.*, vol. 152, p. 02023, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201815202023.
- [2] A. Mukherjee, S. Misra, and N. S. Raghuwanshi, "A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 148, p. 102461, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2019.102461.
- [3] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, and I. Moscholios, "A compilation of UAV applications for precision agriculture," *Computer Networks*, vol. 172, p. 107148, May 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107148.
- [4] B. Allred, N. Eash, R. Freeland, L. Martinez, and D. Wishart, "Effective and efficient agricultural drainage pipe mapping with UAS thermal infrared imagery: A case study," *Agricultural Water Management*, vol. 197, pp. 132–137, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.agwat.2017.11.011.
- [5] E. R. Hunt, M. Cavigelli, C. S. T. Daughtry, J. E. McMurtrey, and C. L. Walthall, "Evaluation of Digital Photography from Model Aircraft for Remote Sensing of Crop Biomass and Nitrogen Status," *Precision Agric.*, vol. 6, no. 4, pp. 359–378, Aug. 2005, doi: 10.1007/s11119-005-2324-5.
- [6] D. Scholz, "Empennage sizing with the tail volume complemented with a method for dorsal fin layout," *INCAS BULLETIN*, vol. 13, no. 3, pp. 149–164, Sept. 2021, doi: 10.13111/2066-8201.2021.13.3.13.
- [7] G. Nugroho, G. Zuliardiansyah, and A. A. Rasyiddin, "Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation," *Aerospace*, vol. 9, no. 4, p. 208, Apr. 2022, doi: 10.3390/aerospace9040208.
- [8] F. Nicolosi, D. Ciliberti, and P. Della Vecchia, "Aerodynamic Design Guidelines of Aircraft Dorsal Fin," in *34th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Washington, D.C.:

- American Institute of Aeronautics and Astronautics, June 2016. doi: 10.2514/6.2016-4330.
- [9] Y. Ito, M. Murayama, S. Koike, K. Yamamoto, K. Nakakita, and K. Kusunose, "Computational Investigation of Vertical Stabilizer with Vortex Generators and Dorsal Fin," *Journal of Aircraft*, vol. 56, no. 5, pp. 1833–1848, Sept. 2019, doi: 10.2514/1.C035301.
- [10] S. Gudmundsson, "The Anatomy of the Tail," in *General Aviation Aircraft Design*, Elsevier, 2014, pp. 459–519. doi: 10.1016/B978-0-12-397308-5.00011-8.
- [11] B. Dai, Y. He, F. Gu, L. Yang, J. Han, and W. Xu, "A vision-based autonomous aerial spray system for precision agriculture," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Macau: IEEE, Dec. 2017, pp. 507–513. doi: 10.1109/ROBIO.2017.8324467.
- [12] P. Skobelev, D. Budaev, N. Gusev, and G. Voschuk, "Designing Multi-agent Swarm of UAV for Precise Agriculture," in *Highlights of Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity: The PAAMS Collection*, vol. 887, J. Bajo, J. M. Corchado, E. M. Navarro Martínez, E. Osaba Icedo, P. Mathieu, P. Hoffa-Dąbrowska, E. Del Val, S. Giroux, A. J. M. Castro, N. Sánchez-Pi, V. Julián, R. A. Silveira, A. Fernández, R. Unland, and R. Fuentes-Fernández, Eds., in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 887, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 47–59. doi: 10.1007/978-3-319-94779-2_5.
- [13] C. A. Rokhmana, "The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 24, pp. 245–253, 2015, doi: 10.1016/j.proenv.2015.03.032.

PEMBUATAN KOMPOSIT Matrik Resin Fenolik Diperkuat Serbuk Logam dan RHA Hibrid dengan Metode Metalurgi Serbuk

Ardiansyah¹, Sukanto^{2*}, Erwanto³, Yudi Oktiadi⁴

¹ Program Studi Teknik Mesin Dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Kawasan Industri Air Kantung Sungailiat Bangka-33211-Telepon (0717) 93586

sukanto@polman-babel.ac.id^{1*}

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data pengaruh variasi persentase matriks resin fenolik dan tekanan kompaksi terhadap sifat mekanik dan fisik komposit hibrid berbasis resin fenolik yang diperkuat serbuk logam (aluminium, kuningan, silika) serta abu sekam padi (RHA) menggunakan metode metalurgi serbuk. Persentase matriks yang digunakan adalah 46%, 54%, dan 62%, sedangkan tekanan kompaksi divariasikan pada 5000 Psi, 5300 Psi, dan 5600 Psi, dengan setiap kombinasi diulang sebanyak tiga kali. Uji kekerasan dilakukan menggunakan metode *Portable Rockwell Brinell*, dan densitas diukur dengan prinsip Archimedes. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan ANOVA faktorial dua faktor untuk mengetahui signifikansi masing-masing variabel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan kompaksi tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan maupun densitas, sedangkan persentase matriks berpengaruh signifikan terhadap kedua sifat tersebut. Kombinasi optimal diperoleh pada matriks 54 % dan kompaksi 5300 Psi dengan nilai kekerasan 82 HB. Densitas tertinggi dicapai pada tekanan 5000 Psi dan matriks 46%, dengan nilai densitas 1,461 g/cm³. Temuan ini menunjukkan bahwa komposit yang dihasilkan berpotensi kuat sebagai material alternatif ramah lingkungan dan aman untuk kanvas rem non-asbes.

Kata kunci : abu sekam padi, densitas, kekerasan, resin fenolik.

Abstract

This research aims to investigate the effects of variations in phenolic resin matrix percentage and compaction pressure on the mechanical and physical properties of hybrid composites based on phenolic resin, reinforced with metal powders (aluminum, brass, silica) and rice husk ash (RHA), using the powder metallurgy method. The matrix percentages used were 46%, 54%, and 62%, while the compaction pressures were varied at 5000 Psi, 5300 Psi, and 5600 Psi, with each combination repeated three times. Hardness was tested using the Portable Rockwell Brinell method, and density was measured using the Archimedes principle. The test data were analyzed using a two-factor factorial ANOVA to determine the significance of each variable. The results showed that compaction pressure had no significant effect on either hardness or density, while matrix percentage significantly affected both properties. The optimal combination was found at 54% matrix and 5300 Psi compaction, achieving a hardness value of 82 HB. The highest density was obtained at 5000 Psi and 46% matrix, with a value of 1.461 g/cm³. These findings indicate that the composite has strong potential as an environmentally friendly and safe alternative material for non-asbestos brake pads.

Key words : rice husk ash, density, hardness, phenolic resin.

PENDAHULUAN

Pada tahun 2015 dilaporkan terdapat sekitar 155.000 kasus kanker paru-paru dan 23.000 kasus mesothelioma yang disebabkan oleh paparan asbes. Meskipun penggunaan asbes telah dilarang di sebagian besar negara Eropa sejak akhir 1990-an, dampak kesehatannya masih dirasakan hingga kini akibat masa laten penyakit yang relatif panjang. Beban penyakit kanker akibat paparan asbes

diperkirakan akan mencapai puncaknya pada periode 2020 hingga 2030. Di Inggris, sekitar 40% kematian akibat kanker paru-paru yang berkaitan dengan pekerjaan serta sekitar 3.500 kasus baru setiap tahun dilaporkan memiliki hubungan dengan paparan asbes dan partikel silika [1]. Industri otomotif, terutama pada sektor kendaraan darat, mengalami perkembangan yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu komponen penting pada sistem pengereman adalah kanvas rem, yang memiliki fungsi utama untuk mengurangi

kecepatan atau menghentikan pergerakan kendaraan [2]. Sebagian besar kampas rem konvensional masih menggunakan material berbasis asbes. Meskipun material ini menunjukkan kinerja yang baik dalam sistem pengereman, penggunaannya menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan akibat sifatnya yang bersifat karsinogenik [3]. Proses gesekan yang terjadi antara cakram dan kampas rem menghasilkan partikel-partikel mikroskopis yang dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia serta berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan [4]. Sebagai alternatif terhadap penggunaan material berbasis asbes, telah dikembangkan komposit dengan matriks polimer, khususnya resin fenolik, untuk meningkatkan kinerja sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan. Proses pembuatan material komposit dapat dilakukan melalui berbagai metode, antara lain *stir casting*, *powder metallurgy*, *compo casting*, *friction stir casting*, *roll bonding*, serta beberapa teknik lainnya yang disesuaikan dengan karakteristik material dan tujuan aplikasi [5]. Material komposit sendiri merupakan gabungan dari dua atau lebih material penyusun dengan sifat yang berbeda, sehingga menghasilkan karakteristik mekanik dan fisis yang lebih unggul dibandingkan dengan material tunggal penyusunnya [6]. Pada penelitian ini, resin fenolik berperan sebagai material matriks yang diperkuat dengan serbuk logam dan abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebagai penguat hibrid (*filler*). Kombinasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanik komposit, khususnya dalam hal kekerasan dan densitas material yang dihasilkan. Resin fenolik merupakan salah satu jenis polimer yang banyak digunakan dalam bidang material komposit, terutama pada aplikasi yang menuntut stabilitas struktural dan ketahanan terhadap suhu tinggi (stabilitas termo-struktural) [7]. Densitas resin fenolik adalah sebesar 1,15 gr/cm³, dengan nilai Modulus Young mencapai 3 GPa serta kekuatan tarik sebesar 50 GPa. Selain itu, resin fenolik memiliki titik leleh pada suhu 160°C [8].

Pada penelitian ini digunakan campuran serbuk logam yang terdiri atas aluminium (Al), kuningan (CuZn), silika (SiO₂), serta abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebagai bahan penguat dalam komposit. Aluminium merupakan salah satu unsur logam paling melimpah di kerak bumi, menempati urutan ketiga setelah oksigen dan silikon, dengan kandungan sekitar 7,6% dari total massa kerak bumi. Sebagai logam ringan, aluminium memiliki peranan penting dalam bidang rekayasa material karena memiliki sejumlah sifat unggul. Beberapa di antaranya adalah ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, serta karakteristik mekanik yang mendukung

penggunaannya dalam berbagai aplikasi industri, termasuk pada komponen otomotif dan struktur teknik [9]. Silika (SiO₂) atau yang umum dikenal sebagai pasir kuarsa, merupakan mineral yang berasal dari endapan tanah aluvial hasil pelapukan dan erosi batuan yang mengandung kuarsa dalam jumlah tinggi. Nilai kekerasan material ini mencapai sekitar 7 berdasarkan skala Mohs, dengan berat jenis berkisar antara 2,60 hingga 2,66, serta titik lebur yang tinggi mencapai sekitar 1715°C, sehingga menjadikannya bahan penguat potensial dalam pembuatan komposit [10]. Kuningan merupakan paduan logam yang tersusun dari tembaga (Cu) dan seng (Zn) sebagai unsur utama pembentuknya. Karena tembaga berperan sebagai komponen dominan, kuningan sering dikategorikan sebagai jenis paduan tembaga. Variasi kadar seng yang terkandung di dalamnya menyebabkan perbedaan warna, mulai dari coklat kemerahan hingga kekuningan keperakan, yang juga dapat memengaruhi sifat mekanik dan fisis material tersebut [11]. Komponen utama kedua dalam paduan kuningan adalah seng (Zn), dengan kadar yang umumnya berkisar antara 5% hingga 40% berat, tergantung pada jenis kuningannya. Seng memiliki sejumlah sifat fisik penting, antara lain massa jenis 6,9–7,2 g/cm³, titik leleh sekitar 419°C, titik didih mendekati 420°C, serta memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi udara lembap [12]. RHA (*Rice Husk Ash*) dihasilkan dari proses pembakaran sekam padi yang telah dipisahkan dari bijinya. Proses pembakaran sekam padi menghasilkan abu yang kaya akan kandungan silika (SiO₂), sehingga memiliki sifat khas yang bermanfaat untuk berbagai aplikasi teknik. Selain itu, penggunaan serbuk RHA dalam material komposit memberikan keuntungan ekonomi dan teknis, antara lain menurunkan biaya produksi, mengurangi pembentukan senyawa korosif aluminium karbida (Al₄C₃), serta berpotensi sebagai bahan pengganti asbes yang lebih ramah lingkungan [13]. RHA banyak dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan beton karena mampu meningkatkan kekuatan tekan, mengurangi porositas, serta meningkatkan durabilitas dan ketahanan terhadap lingkungan agresif [14]. Metalurgi serbuk merupakan salah satu metode produksi material yang menggunakan serbuk logam sebagai bahan dasar sebelum melalui tahap pembentukan. Pada proses ini, serbuk logam dikompaksi sesuai bentuk yang diinginkan, kemudian dilakukan sintering pada suhu sekitar 90% dari titik lebur logam tersebut untuk memperoleh kepadatan dan kekuatan yang optimal [15].

Proses metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) digunakan sebagai metode untuk memadukan berbagai material penyusun komposit,

dengan cara menekan dan memanaskan campuran serbuk hingga terbentuk struktur yang homogen. Melalui proses ini, dihasilkan komposit dengan sifat mekanik dan fisis yang lebih unggul dibandingkan material tunggalnya [16]. Oleh karena itu, pengembangan material kanvas rem dengan kekerasan dan densitas yang optimal menjadi hal yang penting dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan data eksperimental mengenai penggunaan komposit bermatriks resin fenolik yang diperkuat dengan serbuk aluminium dan abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebagai alternatif material kanvas rem yang lebih ramah lingkungan. Proses pembuatan dilakukan dengan mengoptimalkan metode metalurgi serbuk guna memperoleh komposit dengan karakteristik fisis dan mekanik yang unggul.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan resin fenolik FRJ 551 dari PT. Graha Jaya Pratama seperti ditunjukkan Gambar 1, sebagai matrik dan campuran serbuk logam RHA sebagai penguat. Dengan menggunakan 3 variasi fraksi berat matrik berbanding penguat adalah berturut-turut yaitu 46%:54% dan 54%:46%, dan 62%:38%. Komposisi material seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Penguat dicampur terlebih dahulu, dilanjutkan matrik dengan penguat yang telah dicampur dilakukan *Mechanical Alloying*. Rasio tersebut secara keseluruhan menunjukkan performa sifat fisis dan mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan komposisi lain [17]. Resin fenolik yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai ukuran distribusi serbuk hasil dari uji *particle size analyzer* sebesar $D_{50}:78,49 \mu\text{m}$, dengan D_{50} adalah distribusi standart pada 50% penyebaran pada PSA. Untuk aluminium (Al) ditunjukkan pada Gambar 2, kuningan (CuZn) ditunjukkan pada Gambar 3, Silika (SiO_2) ditunjukkan pada Gambar 4 dan RHA ditunjukkan pada Gambar 5, masing-masing memiliki ukuran distribusi serbuk hasil dari uji *particle size analyzer* sebesar $D_{50}:247,66 \mu\text{m}$, $D_{50}:159,10 \mu\text{m}$, $D_{50}:68,62 \mu\text{m}$ dan $D_{50}:145,28 \mu\text{m}$. Pengujian ukuran partikel menggunakan alat *Particle Size Analyzer* dilakukan di Laboratorium Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya Malang.



Gambar 1 Serbuk Resin Fenolik 100 Mesh



Gambar 2. Serbuk Aluminium



Gambar 3. Serbuk Silika

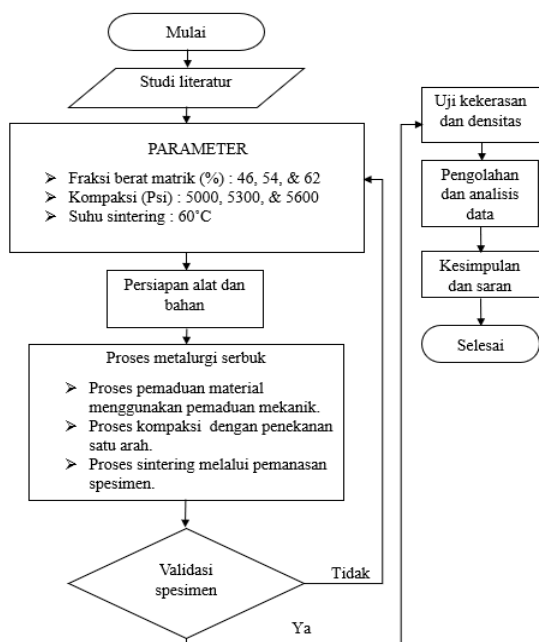


Gambar 4. Kuningan



Gambar 5. Serbuk RHA

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 6, dimulai dari tahap awal (start) kemudian dilanjutkan dengan studi literatur serta penentuan parameter.



Gambar 6. Diagram Alir

Proses selanjutnya adalah persiapan alat dan bahan dilanjutkan dengan proses pencampuran antara serbuk logam dan RHA dengan metode pemaduan mekanik atau *mechanical Alloying* dengan mesin horizontal *Ball mill*. Proses pemaduan mekanik (*mechanical alloying*) menggunakan *ball mill* dalam penelitian ini dilakukan dengan beberapa parameter operasi utama, yaitu rasio berat bola terhadap serbuk (*Ball to Powder Ratio/BPR*) sebesar 10:1, kecepatan putaran 90 rpm, serta waktu penggilingan selama 4 jam. Parameter tersebut dipilih untuk memperoleh dispersi partikel yang merata dan homogenitas campuran yang optimal. Proses *Mechanical Alloying* (MA) dilakukan dengan cara mencampurkan serbuk matrik dengan serbuk penguat, menggunakan mekanisme pemaduan mekanik (MA) bersama media penghancur (*ball*) di dalam tabung *ball mill* berenergi tinggi. Pada proses ini, rasio berat bola terhadap serbuk (*Ball to Powder Ratio/BPR*) umumnya dijaga paling sedikit 10:1. Selama penggilingan berlangsung, terjadi siklus berulang antara pengelasan dingin, pemecahan partikel, dan pengelasan kembali, yang menyebabkan perubahan ukuran partikel hingga mencapai distribusi tertentu.

Ukuran partikel serbuk dapat dikendalikan dengan menyeimbangkan antara proses rekahan atau pecahan dan pengelasan dingin (*cold-weld*) tersebut. Dalam pelaksanaannya, biasanya ditambahkan sekitar 1–2% berat bahan aditif yang disebut *Process Control Agent* (PCA), terutama pada pemrosesan logam bersifat ulet. PCA berfungsi melapisi permukaan partikel untuk mencegah terjadinya pengelasan dingin berlebih, baik antarpartikel maupun antara partikel dengan media dan wadah penggilingan, sehingga menghindari terjadinya aglomerasi. Dengan bertambahnya waktu penggilingan, ukuran partikel dan butir kristal akan semakin mengecil hingga mencapai skala nanometer[18]. Selanjutnya setelah melalui proses pemaduan mekanik adalah proses kompaksi, proses pemadatan ini dilakukan menggunakan mesin press hidrolik yang dilengkapi dengan perangkat atas serta alat pembaca tekanan (*pressure gauge*). Sebelum dilakukan penekanan, cetakan diposisikan pada alat press, lalu bubuk dimasukkan secara merata. Selanjutnya, tekanan diberikan secara simultan satu arah, dengan alat ukur digunakan untuk memantau tekanan yang diterapkan. Tekanan kompaksi yang digunakan bervariasi, yaitu 5000, 5300, dan 5600 Psi, dengan waktu tahan selama 10 menit.

Setelah proses kompaksi selesai selanjutnya dilakukan proses sintering, Proses perlakuan panas menggunakan teknik sintering berfungsi untuk mengikat partikel dalam paduan komposit agar saling berikatan melalui mekanisme

pemanasan dan reaksi kimia yang terjadi selama proses sintering. Dalam penelitian ini, sintering dilakukan pada suhu 60°C dengan waktu tahan (*holding time*) selama 10 menit. Setelah proses sintering selesai, spesimen di biarkan didalam oven dalam keadaan oven terbuka selama 4 jam. pasca proses sintering sampel selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah pengujian densitas dan kekerasan pada spesimen hasil proses dengan dua variasi antara fraksi berat matrik dan tekanan kompaksi yang telah ditentukan. Data hasil pengujian kemudian dianalisis dan dibahas untuk mengetahui data pengaruh perbedaan fraksi berat matrik dan tekanan kompaksi terhadap sifat densitas serta kekerasan komposit yang dihasilkan. Tahap akhir dari penelitian ini adalah penentuan nilai kekerasan Rockwell/Brinell (HB) berdasarkan hasil pengujian, pembahasan, dan analisis data yang telah diperoleh sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produk Berikut merupakan hasil serbuk dari proses *mechanical alloying* selama 4 jam. Masing-masing gambar 7. (46% matrik dan 54% penguat), gambar 8 (54% matrik dan 46%) penguat serta gambar 9 (62% matrik dan 38%) penguat. Berdasarkan gambar dapat disimpulkan bahwa metode pemaduan mekanik (*mechanical alloying*) mampu menghasilkan campuran padatan dengan tingkat homogenitas yang lebih tinggi dibandingkan teknik pencampuran konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa proses pemaduan mekanik efektif dalam mendistribusikan partikel penguat secara merata di dalam penguat.



Gambar 7. 46% matrik dan 54% penguat

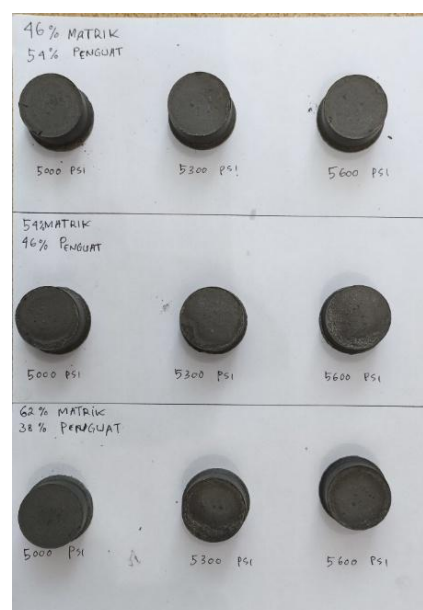


Gambar 8. 54% matrik dan 46% penguat



Gambar 9. 62% matrik dan 38% penguat

Spesimen yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 30 mm dan ketebalan 15 mm. campuran antara matrik dan penguat sebesar 15 gram per spesimen. spesimen hasil cetak dapat dilihat pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Spesimen Hasil Cetak

Pengujian densitas yang dilakukan mengikuti hukum Archimedes pada sampel dengan mengacu pada *American Standard Testing Materials* (ASTM) yaitu berdasarkan standart ASTM B962-17 [19]. Selanjutnya, hasil uji densitas diolah dan dibuat grafik seperti pada gambar 11. Seluruh spesimen uji, baik pada setiap variasi tekanan kompaksi maupun fraksi berat, dibuat tiga kali pengulangan (triplo) untuk memastikan reliabilitas dan konsistensi data.

Berdasarkan gambar 11, hubungan antara tekanan kompaksi dan afraaksi berat, diketahui bahwa kedua variabel tersebut memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai densitas komposit setelah proses sintering. Komposisi dengan 46% matriks dan 54% penguat menunjukkan nilai densitas tertinggi sebesar 1,427 g/cm³ pada tekanan 5300 Psi, diikuti oleh 1,406 g/cm³ pada 5000 psi dan 1,178 g/cm³ pada 5600 Psi. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan fraksi penguat yang disertai tekanan kompaksi optimal mampu meningkatkan kepadatan material secara efektif.

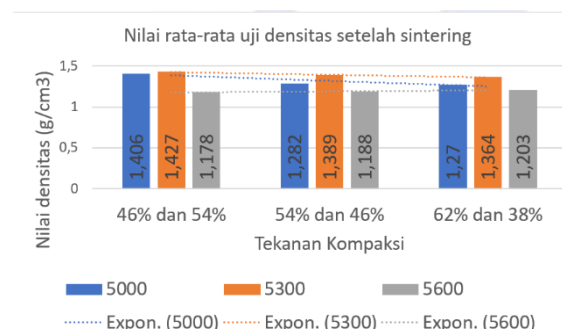
Pada komposisi 54% matriks dan 46% penguat, terjadi penurunan nilai densitas, meskipun tekanan 5300 Psi masih menghasilkan nilai tertinggi, yaitu 1,389 g/cm³. Tekanan 5000 Psi menghasilkan 1,282 g/cm³, sedangkan 5600 Psi menghasilkan 1,188 g/cm³. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan fraksi matriks yang berlebihan dapat meningkatkan porositas selama proses sintering, sehingga mengurangi kepadatan akhir komposit.

Selanjutnya, pada komposisi 62% matriks dan 38% penguat, nilai densitas menurun lebih lanjut, dengan densitas tertinggi sebesar 1,364 g/cm³ pada tekanan 5300 Psi, 1,270 g/cm³ pada 5000 Psi, dan 1,203 g/cm³ pada 5600 Psi. Hasil ini mengindikasikan bahwa dominasi matriks resin fenolik yang bersifat ringan dan mudah terdegradasi saat sintering menyebabkan terbentuknya lebih banyak pori, sehingga densitas akhir komposit berkurang.

Secara keseluruhan, tekanan kompaksi sebesar 5300 Psi menghasilkan nilai densitas tertinggi untuk seluruh variasi komposisi, menandakan bahwa tekanan tersebut merupakan titik optimum dalam proses pembentukan komposit. Sebaliknya, tekanan 5600 Psi menghasilkan densitas lebih rendah, yang kemungkinan disebabkan oleh terjadinya over-kompaksi, sehingga menimbulkan pelepasan gas berlebih atau terbentuknya retakan mikro selama sintering.

Dari garis tren eksponensial pada grafik, terlihat bahwa peningkatan tekanan kompaksi tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan densitas, terutama pada komposisi dengan kandungan matriks yang tinggi. Dengan demikian, kombinasi

yang seimbang antara tekanan kompaksi dan komposisi material menjadi faktor krusial dalam menghasilkan komposit dengan struktur padat, homogen, dan seragam.



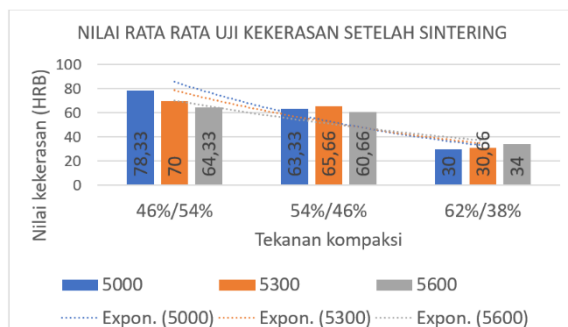
Gambar 11 Grafik Hasil Uji Densitas

Pengujian kekerasan pada spesimen dilakukan menggunakan metode *Portable Rockwell Brinell*, dengan indenter berbentuk bola, agar proses penetrasi dapat mencakup bidang kontak yang lebih luas. Pemilihan metode ini didasarkan pada karakteristik material komposit yang memiliki distribusi partikel penguat tidak sepenuhnya merata, sehingga penggunaan indenter bola diharapkan mampu memberikan hasil pengujian yang lebih representatif terhadap kondisi material sebenarnya.

Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM E110-14 [20], dan hasil pengukurannya ditampilkan pada Gambar 12, yang menunjukkan grafik hubungan antara fraksi berat dan variasi tekanan kompaksi pada nilai kekerasan komposit.

Berdasarkan gambar 13, kekerasan setelah proses sintering, terlihat bahwa variasi tekanan kompaksi dan komposisi material berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan (HB) spesimen. Pada komposisi 54 % matriks, nilai kekerasan tertinggi dicapai, pada tekanan 5300 Psi yaitu 82 HB, kemudian menurun pada tekanan 5000 Psi menjadi 63,33 HB, dan 60,66 HB pada tekanan 5600 Psi. Komposisi 62% matriks dan 38% penguat menunjukkan penurunan kekerasan paling signifikan dengan kekerasan 34 HB, pada tekanan 5600 Psi, sementara pada tekanan 5000 Psi menghasilkan kekerasan yang lebih rendah 30,33 HB.

Secara umum, kecenderungan nilai kekerasan menunjukkan penurunan seiring dengan meningkatnya kandungan matriks dan menurunnya kandungan penguat. Selain itu, grafik trendline eksponensial memperlihatkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi tidak selalu meningkatkan kekerasan, terutama pada komposisi penguat yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi komposisi optimal dan tekanan kompaksi sangat mempengaruhi sifat mekanik material hasil sintering.



Gambar 12 Grafik Hasil Uji Kekerasan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pembuatan komposit dengan matriks resin fenolik yang diperkuat oleh serbuk logam (aluminium, kuningan, silika) dan abu sekam padi (RHA) secara hibrid menggunakan metode metalurgi serbuk, diperoleh bahwa variasi tekanan kompaksi dan fraksi berat berpengaruh terhadap sifat mekanik dan fisik komposit yang dihasilkan. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada tekanan kompaksi 5300 Psi dengan fraksi matriks sebesar 54%, yaitu sebesar 82 HB, sedangkan nilai densitas tertinggi dicapai pada tekanan kompaksi 5000 Psi dengan fraksi matriks 46%, yaitu sebesar 1,427 g/cm³.

Penambahan serbuk logam dan abu sekam padi (RHA) pada matriks resin fenolik mampu meningkatkan kekerasan komposit dan menunjukkan hasil yang telah memenuhi standar SNI kampas rem sepeda motor, yaitu pada rentang 65-105 HB. Namun demikian, nilai densitas komposit yang diperoleh masih berada di bawah standar SNI kampas rem sepeda motor, yang mensyaratkan nilai densitas berada pada kisaran 1,5–2,5 g/cm³. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi tekanan kompaksi dan komposisi yang digunakan telah memberikan peningkatan kekerasan yang signifikan, meskipun perlu dilakukan optimasi lebih lanjut untuk mencapai densitas yang sesuai standar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini, yaitu:

1. Kepada Laboratorium Kimia Fakultas MIPA Universitas Brawijaya atas dukungan dan bantuan dalam pelaksanaan pengujian *Particle Size Analyzer*.
2. Kepada Direktur, Ketua Jurusan Teknik Mesin, Kepala Laboratorium Teknik Material dan Pengelasan, serta para Laboran di Politeknik

Manufaktur Negeri Bangka Belitung atas kontribusinya dalam penyediaan dana, fasilitas, serta dukungan sarana dan prasarana selama proses penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Desdiani, *Penyakit Paru Akibat Kerja*, 1st Ed. Bandung: Media Sains Indonesia, 2023.
- [2] Febriany Sulis, Sukanto, And Subkhan, "Pengaruh Tekanan Kompaksi Terhadap Densitas Dan Kekerasan AMC Diperkuat SiC Dan Rha Metode Metalurgi Serbuk," *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, Vol. 02, No. 2, Pp. 388–395, 2024, Doi: <https://doi.org/10.33504/Jitt.V2i2.143>.
- [3] F. Yudhanto, S. A. Dhewanto, dan S. W. Yakti, "Karakterisasi Bahan Kampas Rem Sepeda Motor Dari Komposit Serbuk Kayu Jati," *Quantum Teknika: Jurnal Teknik Mesin Terapan*, Vol. 1, No. 1, 2019, Doi: 10.18196/Jqt.010104.
- [4] N. Iman dan D. Widjanarko, "Karakteristik Komposit Partikel Arang Kayu Akasia Bermatrik Epoxy Sebagai Salah Satu Alternatif Kampas Rem Non-Asbestos," Jan. 2020. Doi: <https://doi.org/10.14710/Rotasi.22.1.7-13>.
- [5] M. Asep, Sugiyarto, Somawardi, A. Rusdy, dan Sukanto, "Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Panas Terhadap Densitas Dan Kekerasan Amc Diperkuat SiO₂," *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 9, No. 1, Pp. 1–7, May 2023, Doi: 10.33019/Jm.V9i1.3606.
- [6] M. Nurul Ihsan, D. Wicaksono, dan S. Sehon, "Uji Keausan Kampas Rem Berbahan Limbah Organik Menggunakan Metode Ogoshi," *Teknika Stkd: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, Vol. 8, No. 1, Pp. 92–96, Nov. 2022, Doi: 10.56521/Teknika.V8i1.559.
- [7] M. Asim, N. Saba, M. Jawaid, M. Nasir, M. Pervaiz, dan O. Y. Alothman, "A Review On Phenolic Resin And Its Composites," 2018, *Bentham Science Publishers*. Doi: 10.2174/1573411013666171003154410.
- [8] A. Subagia, A. Atmika, Suardana, Robby, And Steven, "Pengaruh Temperatur Sinter Terhadap Kekerasan dan Keausan Kampas Rem Berbasis Komposit Hibrida Serbuk Tempurung Kelapa/Alumina/Phenolic Resin," *Jurnal*

- Energi Dan Manufaktur*, Vol. 11, No. 2, Pp. 42–48, Oct. 2018, Doi: 10.24843/Jem.2018.V11.I02.P02.
- [9] Sukanto, I.A. Wahyudie, Erwanto, Y. Oktriadi, Rodika, R. Irwansyah, Husman, D. D.Saputra, dan H.T. Algaza “Fabrication Of Aluminium Matrix Composite Powder Reinforced With Silicon Dioxide Tailings For Non-Asbestos Brake Pads (Nob),” *Jurnal Penelitian Pendidikan Ipa*, Vol. 10, No. 10, Pp. 7696–7704, Oct. 2024, Doi: 10.29303/Jppipa.V10i10.9208.
- [10] B. Tri Prasetya, “Jurnal Teslink : Teknik Sipil Dan Lingkungan Analisis Pembuatan Paving Block Menggunakan Campuran Limbah Pecahan Keramik dan Pasir Silika Sebagai Pengganti Sebagian Pasir Terhadap Kuat Tekan (Literature Review),” Vol. 6, No. 1, Pp. 76–84, 2024, Doi: 10.52005/Teslink.V115i1.Xxx.
- [11] M. A. Pradana dan M. Widyartono, “Prototipe Pembangkit Listrik Termoelektrik Generator Menggunakan Penghantar Panas Aluminium, Kuningan Dan Seng.” Accessed: Oct. 08, 2025. [Online]. Available: Oai:Ojs.Journal.Unesa.Ac.Id:Article/30775.
- [12] A. Ghofur, J. Akhmad Yani Km, dan K. Selatan, “Penggunaan Kuningan Sebagai Bahan Catalytic Converter Terhadap Emisi Gas Buang Dan Performa Mesin Suzuki Shogun Axelo 125,” 2019. Doi: <https://doi.org/10.20527/SjmeKinematika.V4i2.118>.
- [13] A. G. Dylan, Sugiyarto, A. Wanto, A. Budi, dan Sukanto, “Pembuatan Komposit Matrik Alumunium Diperkuat Silicon Carbida Dan Rice Husk Dengan Metode Metalurgi Serbuk,” *Lontar Jurnal Teknik Mesin Undana*, Vol. 10, Pp. 61–68, 2023, Doi: <https://doi.org/10.35508/Ljtmu.V10i02.13481>
- [14] A. E. Duke dan E. E. Eno, “Rice Husk Ash Pozzolan As Valuable Supplement In Concrete For Industrial And Domestic Applications,” *Asian Journal Of Physical And Chemical Sciences*, Pp. 1–7, Apr. 2019, Doi: 10.9734/Ajopacs/2019/V7i130088.
- [15] Fahrian Hasbi, Sukanto, dan Erwanto, “Pengaruh Variasi Fraksi Penguat Dan Suhu Sintering Amc Terhadap Nilai Densitas Dan Kekerasan Dengan Sio₂/Rha/Ba,” *Machine; Jrnal Teknik Mesin*, Vol. 11, Pp. 25–29, Apr. 2025, Doi: <https://doi.org/10.33019/Jm.V11i1.5871>.
- [16] A. Supriyanto, S. A. Krisna, dan Muh. V. Hermawan, “Eksperimen Variasi Ukuran Butir Dan Tekanan Kompaksi Campuran Al-Si Terhadap Densitas dan Porositas Metode Metalurgi,” *Jurnal Teknika*, Vol. 7, Pp. 108–115, 2022, Doi: <https://doi.org/10.52561/Teknika.V7i3.179>.
- [17] Sukanto, W. Suprpto, R. Soenoko, dan Y. S. Irawan, “The Effect Of Milling Time On The Alumina Phase Transformation In The Amcs Powder Metallurgy Reinforced By Silica-Sand-Tailings,” *Eureka, Physics And Engineering*, No. 1, Pp. 103–117, Jan. 2022, Doi: 10.21303/2461-4262.2022.001906.
- [18] C. Suryanarayana, “Mechanical Alloying: A Novel Technique To Synthesize Advanced Materials,” *Research*, Vol. 2019, Jan. 2019, Doi: 10.34133/2019/4219812.
- [19] ASTM B962-17 “Test Methods For Density Of Compacted Or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes Principle,” Apr. 01, 2017, *Astm International, West Conshohocken, Pa.* Doi: 10.1520/B0962-17.
- [20] ASTM E110-14 “Test Method For Rockwell And Brinell Hardness Of Metallic Materials By Portable Hardness Testers,” Jan. 01, 2010, *Astm International, West Conshohocken, Pa.* Doi: 10.1520/E0110-10.

ANALISA LAJU PERPINDAHAN PANAS PADA MESIN PENGERING BIJI KOPIM. Rakha Al Hakim¹, Fenoria Putri², Muhammad Irfan Dzaky³¹ Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Lama, Kec. Ilir Barat. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30128

Alhakimrakha03@gmail.com¹**Abstrak**

Kota Pagar Alam, sebagai salah satu daerah penghasil kopi di Sumatera Selatan, masih banyak menggunakan metode pengeringan tradisional yang bergantung pada sinar matahari dengan kekurangan sangat ketergantungan terhadap cuaca. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan memvariasikan debit udara sebesar 300, 400, dan 500 liter per menit serta temperatur udara pengering 60°C, 70°C, dan 80°C. Parameter yang diamati meliputi penurunan massa biji kopi, penyusutan kadar air, dan laju perpindahan panas. Alat bantu yang digunakan antara lain thermocouple, hot wire anemometer, RH meter, dan timbangan digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi debit dan temperatur udara, semakin besar laju perpindahan panas dan semakin cepat penurunan kadar air biji kopi. Pada debit udara 500 LPM dengan suhu 80°C diperoleh laju perpindahan panas tertinggi sebesar 343 W, dengan penurunan massa terbesar sebesar 534 gram dari massa awal 2100 gram, kadar air akhir mencapai 38,93%.

Kata kunci : pengeringan kopi, biji kopi robusta, debit udara, suhu pengering, perpindahan panas.

Abstract

Pagar Alam City, as one of the coffee-producing regions in South Sumatra, still relies heavily on traditional sun drying methods, which are highly dependent on weather conditions. The experiment was carried out by varying the air flow rate at 300, 400, and 500 liters per minute and drying air temperature at 60°C, 70°C, and 80°C. The observed parameters included the reduction of coffee bean mass, moisture content decrease and the heat transfer rate. Supporting instruments used in this study included thermocouples, a hot wire anemometer, an RH meter, and a digital scale. The results showed that increasing both the air flow rate and drying temperature significantly enhanced the heat transfer rate and accelerated the reduction of moisture content in the coffee beans. At an air flow rate of 500 LPM and a temperature of 80°C, the highest heat transfer rate of 343 W, was obtained, with the largest mass reduction of 534 grams from an initial mass of 2100 grams, a final moisture content of 38.93%.

Key words : coffee drying, robusta coffee beans, air flow rate, drying temperature, heat transfer.

PENDAHULUAN

Kota Pagar Alam merupakan salah satu daerah penghasil kopi utama di Provinsi Sumatera Selatan dengan luas perkebunan mencapai 8.237 hektar dan tingkat produktivitas sekitar 12.782 kg per tahun [1]. Kopi merupakan komoditas unggulan yang memiliki kontribusi besar terhadap perekonomian masyarakat setempat. Namun, permasalahan utama yang dihadapi oleh petani adalah proses pascapanen, khususnya pada tahap pengeringan biji kopi. Proses pengeringan yang masih banyak dilakukan secara tradisional menggunakan sinar matahari sangat bergantung pada kondisi cuaca, sehingga sering menyebabkan kadar air biji kopi tidak stabil. Ketidakstabilan

kadar air tersebut dapat menurunkan mutu fisik dan cita rasa kopi akibat pertumbuhan jamur dan perubahan warna biji [2].

Menurut SNI 01-2907-1999, kadar air maksimum yang direkomendasikan untuk penyimpanan biji kopi adalah 12% agar mutu tetap terjaga dan mencegah pertumbuhan mikroorganisme [3]. Namun, pada praktiknya, proses pengeringan alami sering kali tidak mampu mencapai kadar air tersebut secara konsisten, terutama saat kondisi kelembapan udara tinggi. Oleh karena itu, inovasi teknologi pengeringan menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan proses.

Salah satu teknologi modern yang dapat diterapkan adalah sistem pengering berbasis heat pump drying yang memanfaatkan prinsip kerja

siklus refrigerasi. Sistem ini bekerja dengan cara mengondensasikan uap air dari udara lembab dan memanaskannya kembali sehingga dapat digunakan kembali dalam siklus tertutup. Metode ini lebih efisien dibandingkan pengeringan konvensional karena mampu menghemat energi dan mengontrol suhu serta kelembapan secara stabil [4]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem refrigerasi dengan double condenser mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mempercepat proses pengeringan biji kopi [5].

Masalah lain yang dihadapi dalam pengeringan kopi adalah lamanya waktu pengeringan dan tingginya konsumsi energi yang dibutuhkan [6]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh debit udara dan temperatur udara pengering terhadap laju perpindahan panas pada biji kopi robusta menggunakan sistem pengering berbasis refrigerasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi pengering kopi yang lebih efisien serta menjadi referensi dalam penerapan sistem pengering modern di daerah penghasil kopi seperti Kota Pagar Alam.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif, yaitu dengan melakukan pengujian langsung terhadap mesin pengering kopi berbasis sistem refrigerasi. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan debit udara sebesar 300, 400, dan 500 liter per menit (LPM) serta temperatur udara pengering sebesar 60°C, 70°C, dan 80°C. Setiap kombinasi variabel diuji selama waktu pengeringan tertentu untuk mengamati perubahan massa, kadar air, dan besarnya laju perpindahan panas yang terjadi.

1. Bahan

Objek penelitian dalam penelitian ini adalah biji kopi robusta yang berasal dari Desa Penandingan, Kota Pagar Alam, Sumatera Selatan.



Gambar 1 Sampel Biji kopi robusta

Sampel yang digunakan merupakan biji kopi hasil panen segar yang belum mengalami proses pengeringan dengan kadar air awal 64,36%, sesuai hasil uji laboratorium kadar air menggunakan metode SNI 01-2907-2008. Setiap percobaan menggunakan massa awal biji kopi sebesar 2.100 gram yang dikeringkan menggunakan variasi debit dan temperatur udara pengering

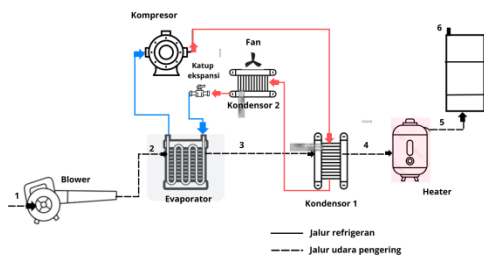
2. Alat

Alat utama yang digunakan adalah mesin pengering kopi berbasis sistem refrigerasi dengan tipe *double condenser heat pump*. Komponen utama terdiri atas kompresor, kondensor ganda, evaporator, katup ekspansi, serta ruang pengering dengan dimensi 50 × 50 × 50 cm dan dilengkapi blower untuk mensuplai udara ke ruang pengering, serta heater untuk meningkatkan suhu sesuai dengan variasi yang diinginkan, Refrigeran yang digunakan adalah R-410A.



Gambar 2 Mesin Pengering Kopi Sistem Refrigerasi

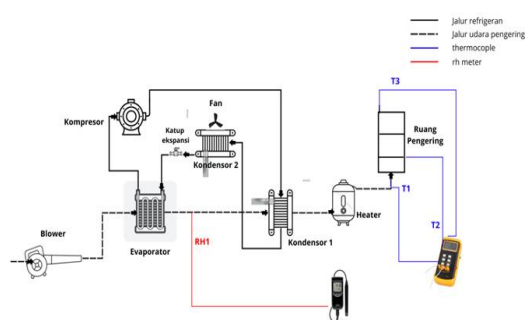
Alat Sensor yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Hot wire anemometer untuk mengukur kecepatan udara yang selanjutnya dikonversi menjadi debit udara (LPM). Rh meter digunakan untuk mengukur kelembapan relatif udara sebelum dan sesudah proses pengeringan. Timbangan digital untuk mengukur perubahan massa biji kopi sebelum dan sesudah proses pengeringan.



Gambar 3 Siklus kerja mesin pengering sistem refrigerasi

Udara dari lingkungan pertama kali disedot oleh blower dan dialirkan ke dalam sistem pengering. Selanjutnya, udara tersebut melewati evaporator, tempat di mana udara didinginkan sehingga uap air di dalamnya mengembun. Proses ini secara langsung menurunkan kelembaban udara, menjadikannya lebih kering. Udara kering tersebut kemudian diarahkan ke kondensator 1, yang memanfaatkan panas buangan dari siklus refrigerasi untuk memanaskan udara, meningkatkan suhu awal. Setelah dari kondensator 1, udara mengalir ke heater gas, di mana suhu udara dinaikkan lagi hingga mencapai tingkat optimal untuk proses pengeringan. Udara panas ini kemudian disirkulasikan ke dalam ruang pengering, di mana udara bersentuhan langsung dengan biji kopi dan menguapkan kadar air yang terkandung di dalamnya. Uap air yang terbentuk dibawa keluar oleh aliran udara kering tersebut. Sementara itu, di sisi lain, sistem refrigerasi tertutup bekerja secara berkesinambungan. Kompresor menekan refrigeran dalam bentuk gas untuk masuk ke kondensator 2, yang dibantu oleh kipas (fan) untuk membuang panas ke lingkungan. Setelah melewati katup ekspansi, tekanan refrigeran diturunkan sehingga suhunya ikut turun, lalu masuk kembali ke evaporator untuk menyerap panas dari udara dan mengulang siklus pendinginan. Seluruh rangkaian ini bekerja simultan untuk menjaga suhu dan kelembaban tetap stabil selama proses pengeringan berlangsung.

3. Posisi Alat Ukur



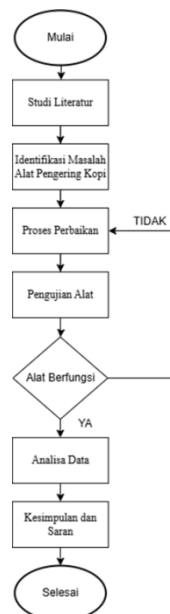
Gambar 4 Posisi Alat ukur

Termokopel 1 (T1) dipasang pada jalur masuk ruang pengering, tepat sebelum udara memasuki ruang pengering. Peletakan ini bertujuan untuk mengukur suhu udara pengering yang berasal dari sistem pemanas setelah mengalami proses pemanasan.

Termokopel 2 (T2) ditempatkan di dalam ruang pengering, posisi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi suhu aktual di dalam ruang pengering.

Termokopel 3 (T3) dipasang pada jalur keluar ruang pengering, setelah udara melewati biji kopi. Sensor ini berfungsi untuk mengukur suhu udara pengering setelah menyerap panas dari biji kopi yang sedang dikeringkan.

Sensor *Relative Humidity* 1 (RH1) diletakkan pada jalur udara dari evaporator menuju kondensator 1. Sensor ini digunakan untuk memantau tingkat kelembaban udara yang telah didinginkan oleh evaporator.



Gambar 5 Diagram Alir Penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan memvariasikan debit udara sebesar 300, 400, dan 500 liter per menit (LPM) serta temperatur udara pengering sebesar 60°C, 70°C, dan 80°C.



Gambar 6 Biji kopi robusta

Pengujian dilakukan selama 60 menit untuk setiap variasi, dan hasil pengukuran menunjukkan adanya penurunan massa yang signifikan seiring peningkatan suhu dan debit udara.

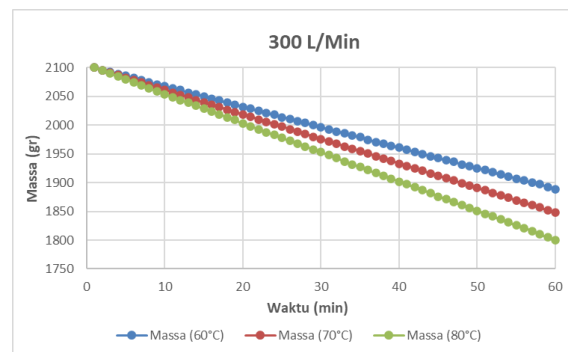
Tabel 1 Data hasil penurunan massa

Debit Udara (L/min)	Suhu (°C)	Massa Awal (g)	Massa Akhir (g)	Penurunan Massa
300	(60°C)	2100	1889	211
	(70°C)	2100	1848	252
	(80°C)	2100	1800	300
400	(60°C)	2100	1844	256
	(70°C)	2100	1790	310
	(80°C)	2100	1759	341
500	(60°C)	2100	1796	304
	(70°C)	2100	1671	429
	(80°C)	2100	1566	534

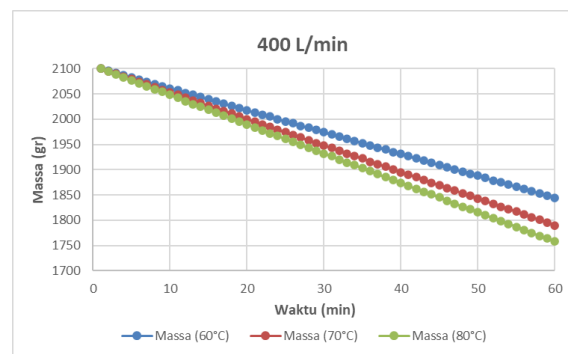
Hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 1 dapat dianalisis bahwa peningkatan suhu dan debit udara pengering memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan massa biji kopi robusta selama proses pengeringan. Pada setiap tingkat debit udara, kenaikan suhu dari 60°C ke 80°C menyebabkan peningkatan penurunan massa secara bertahap.

Pada debit 300 LPM, penurunan massa meningkat dari 211 gram pada suhu 60°C menjadi 300 gram pada suhu 80°C. Pola serupa juga terlihat pada debit 400 LPM, yang meningkat dari 256 gram menjadi 341 gram, serta pada debit 500 LPM yang menunjukkan peningkatan signifikan dari 304

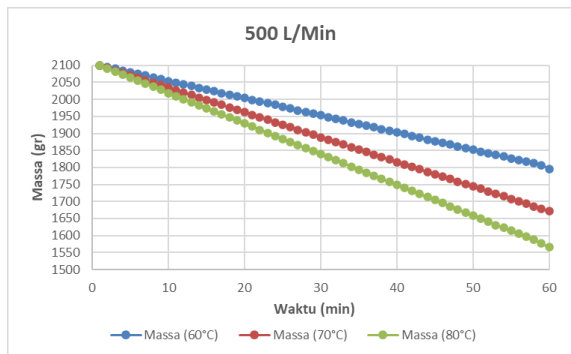
gram menjadi 534 gram. Hal ini menunjukkan bahwa suhu udara yang lebih tinggi mempercepat proses penguapan air dari biji kopi. Selain itu, pada setiap tingkat suhu, peningkatan debit udara juga berbanding lurus dengan peningkatan penurunan massa. Pada suhu 60°C, debit 300 LPM menghasilkan penurunan massa sebesar 211 gram, sedangkan pada debit 500 LPM penurunannya mencapai 304 gram. Begitu pula pada suhu 80°C, penurunan massa meningkat signifikan dari 300 gram pada debit 300 LPM menjadi 534 gram pada debit 500 LPM. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar debit udara yang digunakan, semakin cepat proses pengeringan berlangsung karena peningkatan laju perpindahan panas dan massa uap air dari permukaan biji kopi ke udara. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi suhu dan debit udara yang tinggi memberikan hasil pengeringan yang lebih optimal. Kondisi paling efektif dalam penelitian ini diperoleh pada kombinasi suhu 80°C dan debit udara 500 LPM, yang menghasilkan penurunan massa terbesar sebesar 534 gram, menandakan proses pengeringan berlangsung paling cepat dan efisien pada kondisi tersebut.



Gambar 7 Grafik hasil pengeringan 300 L/min



Gambar 8 Grafik hasil pengeringan 400 L/min



Gambar 9 Grafik hasil pengeringan 500 L/min

Grafik perubahan massa biji kopi terhadap waktu menunjukkan bahwa semakin lama proses pengeringan berjalan, massa biji kopi semakin berkurang secara bertahap. Pada awalnya, massa biji kopi sekitar 2.100 g. Selama 60 menit proses pengeringan, massa terus menurun karena air di dalam biji kopi menguap terbawa oleh aliran udara panas.

Hasil pengamatan memperlihatkan bahwa suhu yang lebih tinggi membuat biji kopi lebih cepat kering. Misalnya pada debit udara 300 LPM, setelah 60 menit pengeringan massa biji kopi turun menjadi 1.889 g pada suhu 60°C, lalu 1.848 g pada suhu 70°C, dan semakin rendah menjadi 1.800 g pada suhu 80°C. Ini terjadi karena semakin tinggi suhu udara, semakin besar perbedaan suhu dengan biji kopi, sehingga proses pemanasan dan penguapan air berlangsung lebih cepat.

Selain suhu, jumlah udara yang ditiupkan (debit udara) juga sangat memengaruhi kecepatan pengeringan. Pada suhu 80°C, massa akhir biji kopi mencapai 1.800 g pada debit 300 LPM, turun menjadi 1.759 g pada 400 LPM, dan semakin rendah menjadi 1.566 g pada 500 LPM. Semakin besar debit udara, semakin cepat aliran udara bergerak sehingga panas lebih mudah masuk ke biji kopi dan mempercepat penguapan air.

Kombinasi suhu tinggi dan debit udara besar terbukti menghasilkan pengeringan paling cepat. Kondisi terbaik ada pada suhu 80°C dengan debit 500 LPM, di mana massa biji kopi turun hingga 1.566 g atau berkurang sekitar 534 g dari massa awal. Sebaliknya, pengeringan paling lambat terjadi pada suhu 60°C dengan debit 300 LPM, dengan penurunan massa hanya sekitar 211 g.

Secara keseluruhan, percobaan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dan semakin besar debit udara, semakin cepat biji kopi kehilangan air. Hasil ini sesuai dengan prinsip dasar bahwa semakin banyak energi panas dan semakin kuat aliran udara, semakin cepat pula proses penguapan air dari dalam bahan.

Analisa Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas dalam proses pengeringan sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran udara dan suhu, yang dikarakterisasi oleh besaran nondimensi seperti bilangan Reynolds (*Re*), bilangan Prandtl Number (*Pr*), dan Dalam Pada penelitian ini, bilangan Reynolds dihitung untuk mengetahui karakter aliran udara yang terjadi pada saluran pengering digunakan pendekatan berdasarkan persamaan rumus:

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

Re = Reynolds

U = Kecepatan rata rata aliran udara (m/s)

L = Panjang diameter hidrolis ruang pengering (m)

ν = Viskositas kinematik udara (m²/s)

Dalam persamaan ini luas area keseluruhan kopi diasumsikan 50 x 50

Menghitung Reynold (*Re*) 300 lpm 60°

$$Re = \frac{0,02 \times 0,25}{18,97 \times 10^{-6} m^2/s} = 263,57 \dots\dots\dots(2)$$

$$300 \text{ lpm } 70^\circ = 249,75$$

$$300 \text{ lpm } 80^\circ = 237,08$$

Menghitung Reynold (*Re*) 400 lpm 60°

$$Re = \frac{0,024 \times 0,25}{18,97 \times 10^{-6} m^2/s} = 316,29 \dots\dots\dots(3)$$

$$400 \text{ lpm } 70^\circ = 299,70$$

$$400 \text{ lpm } 80^\circ = 284,50$$

Menghitung Reynold (*Re*) 500 lpm 60°

$$Re = \frac{0,032 \times 0,25}{18,97 \times 10^{-6} m^2/s} = 421,72 \dots\dots\dots(4)$$

$$500 \text{ lpm } 70^\circ = 399,60$$

$$500 \text{ lpm } 80^\circ = 379,33$$

Nilai nilai seperti *p*, *k*, *Cp*, *ν* dan *Pr* diperoleh dari Tabel [8].

Keterangan:

p = rho udara

k = konduktivitas termal biji kopi

ν = viskositas kinematik udara

Pr = Prandtl Number

Untuk mengetahui nilai koefisien perpindahan panas konveksi (*h*) digunakan pendekatan berdasarkan persamaan rumus.

$$h = 0.664 \cdot \frac{k}{L} (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3}$$

Menghitung nilai koefisien perpindahan panas (*h*) 300 lpm 60°

$$h = 0.664 \times \frac{0,6}{0,25} \times (263,57)^{1/2} \times (0,696)^{1/3} =$$

$$22,928 \dots\dots\dots(5)$$

300 lpm 70° = 22,297

300 lpm 80° = 21,703

Menghitung nilai koefisien perpindahan panas (*h*)
400 lpm 60°

$$h = 0.664 \times \frac{0.6}{0.25} \times (316,29)^{1/2} \times 0,696^{1/2} = 25,116 \dots\dots\dots(6)$$

400 lpm 70° = 24,425

400 lpm 80° = 23,774

Menghitung nilai koefisien perpindahan panas (*h*)
500 lpm 60°

$$h = 0.664 \times \frac{0.6}{0.25} \times (421,72)^{1/2} \times 0,696^{1/3} = 29,001 \dots\dots\dots(7)$$

500 lpm 70° = 28,204

500 lpm 80° = 27,452

Untuk menghitung jumlah panas yang ditransfer secara konveksi dari fluida ke permukaan maka digunakan rumus konveksi sebagai berikut:

$$q = h A (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas (Watt/meter)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi(W/m²·K)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m²)

T_s = Suhu udara pemanas (°C)

T_∞ = Suhu awal Biji Kopi (°C)

Dalam persamaan ini luas permukaan perpindahan panas biji kopi diasumsikan 50 x 50 dan suhu awal biji kopi diasumsikan 30° C.

$$300 \text{ lpm } 60^\circ = 22,928 \times 0.25 \times (60 - 30) = 172 \text{ W} \dots\dots\dots(9)$$

$$300 \text{ lpm } 70^\circ = 22,297 \times 0.25 \times (70 - 30) = 223 \text{ W}$$

$$300 \text{ lpm } 80^\circ = 21,703 \times 0.25 \times (80 - 30) = 271 \text{ W}$$

$$400 \text{ lpm } 60^\circ = 25,116 \times 0.25 \times (60 - 30) = 188 \text{ W}$$

$$400 \text{ lpm } 70^\circ = 24,425 \times 0.25 \times (70 - 30) = 244 \text{ W}$$

$$400 \text{ lpm } 80^\circ = 23,774 \times 0.25 \times (80 - 30) = 297 \text{ W}$$

$$500 \text{ lpm } 60^\circ = 29,001 \times 0.25 \times (60 - 30) = 218 \text{ W}$$

$$500 \text{ lpm } 70^\circ = 28,204 \times 0.25 \times (70 - 30) = 282 \text{ W}$$

$$500 \text{ lpm } 80^\circ = 27,452 \times 0.25 \times (80 - 30) = 343 \text{ W}$$

Hasil Dalam perhitungan ini, luas permukaan perpindahan panas biji kopi diasumsikan sebesar 50 x 50 cm atau 0,25 m², sedangkan suhu awal biji kopi diasumsikan 30°C.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan $q = h A (T_s - T_\infty)$ diperoleh bahwa nilai laju perpindahan panas meningkat seiring dengan kenaikan suhu pemanas dan debit udara pengering. Pada debit udara 300 LPM, nilai Q yang dihasilkan berturut-turut adalah 172 W pada suhu 60°C, 223 W pada 70°C, dan 271 W pada 80°C. Untuk debit 400 LPM, nilai Q sebesar 188 W, 244 W, dan 297 W pada suhu 60°C, 70°C, dan 80°C. Sedangkan pada debit 500 LPM, nilai Q diperoleh sebesar 218 W pada 60°C, 282 W pada 70°C, dan 343 W pada 80°C.

Dari data hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pemanas maka selisih suhu antara udara pengering dan biji kopi juga semakin besar, sehingga jumlah energi panas yang ditransfer ke biji kopi meningkat. Selain itu, peningkatan debit udara menyebabkan perpindahan panas secara konveksi menjadi lebih efektif karena udara panas yang mengalir lebih banyak dapat membawa energi panas ke permukaan biji kopi dengan lebih merata.

Kombinasi terbaik diperoleh pada debit udara 500 LPM dan suhu 80°C, dengan laju perpindahan panas tertinggi sebesar 343 W. Hal ini menunjukkan bahwa pengeringan dengan debit udara besar dan suhu tinggi mampu mempercepat proses pengeringan biji kopi karena energi panas yang ditransfer lebih besar.

Analisa Penurunan Kadar Air

Kandungan air dalam bahan, khususnya hasil pertanian, dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu air bebas (*free water*) dan air terikat (*bound water*). Air bebas merupakan air yang berada pada permukaan bahan dan jumlahnya merupakan selisih antara kadar air total bahan dengan kadar air kesetimbangan pada kondisi suhu dan kelembaban tertentu. Sementara itu, air terikat adalah air yang berada di dalam jaringan bahan dan terikat secara fisik maupun kimia, dengan tekanan uap lebih rendah dibandingkan dengan cairan murni pada suhu yang sama [9].

Dalam proses pengeringan, air yang pertama kali diuapkan adalah air bebas, kemudian dilanjutkan dengan air terikat. Air yang dapat diuapkan ini sering disebut sebagai *vaporable water*. Untuk menguapkan air tersebut diperlukan energi, di mana energi penguapan untuk air terikat secara fisik lebih besar dibandingkan dengan air bebas, dan energi terbesar dibutuhkan untuk menguapkan air yang terikat secara kimia [9].

Prinsip dasar pengeringan adalah terjadinya perpindahan air dari bahan ke udara karena adanya perbedaan kandungan uap air antara udara pengering dengan bahan. Proses ini

menyebabkan kadar air bahan berkurang seiring dengan penyerapan energi panas yang digunakan untuk menguapkan air [10].

Ada dua cara untuk menyatakan kandungan air pada biji kopi, yaitu:

1. Basis Kering (dry basis) Kadar air secara basis kering (dry basis) adalah perbandingan antara berat air didalam bahan tersebut dengan bahan keringnya.
2. Basis Basah (wet basis) Kadar air secara basis basah (wet basis) adalah perbandingan antara berat air didalam bahan tersebut dengan berat bahan basah. Untuk menghitung kadar air biji kopi kering yang diperkirakan dapat digunakan persamaan berikut ini (11).

Untuk menghitung massa kadar air diperoleh menggunakan persamaan rumus:

$$w_i = \frac{(W_{kb} - W_{kk})}{W_{kb}} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

Untuk menghitung berat air biji kopi awal, dapat digunakan persamaan berikut ini:

$$w_i = W_{kb} \times w_i \dots\dots\dots(11)$$

Untuk menghitung berat kering biji kopi, dapat digunakan persamaan berikut ini:

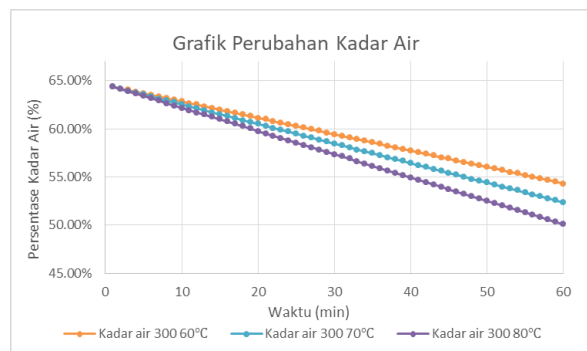
$$w_i = W_{kb} - w_{ko} \dots\dots\dots(12)$$

Dimana :

- w_i = kadar air awal biji kopi (%)
- W_{kb} = berat biji kopi basah (gram)
- W_{kk} = berat biji kopi kering (gram)
- W_{ko} = berat air biji kopi (gram)

Berikut perhitungan kadar air dari biji kopi untuk mengetahui penurunan kadar air selama telah dilakukan proses pengeringan. Yang dimana telah dilakukan pengujian kadar air awal di Kementerian Perindustrian dengan Metode Uji SNI-2907-2008 yang mendapatkan hasil uji kadar air 64,36%.

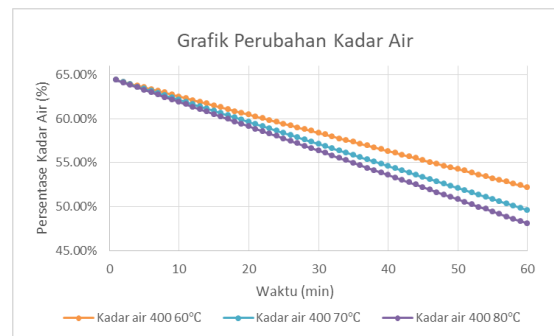
$$64.36\% = \frac{(2100 - 748)}{2100} \times 100\% \dots\dots\dots(13)$$



Gambar 10 Grafik kadar air 300 lpm

Berdasarkan grafik penyusutan kadar air diatas terlihat bahwa kadar air awal biji kopi robusta adalah sebesar 64,36% untuk semua variasi suhu udara pengering (60°C, 70°C, dan 80°C). Selama proses pengeringan selama 60 menit, terjadi penurunan kadar air yang cukup signifikan seiring bertambahnya waktu dan naiknya suhu udara pengering. Pada suhu 60°C, kadar air menurun dari 64,36% menjadi 54,31%, sehingga terjadi penyusutan kadar air sebesar 10,05%. Sementara pada suhu 70°C, kadar air akhir tercatat sebesar 52,36%, yang berarti terjadi penyusutan sebesar 12,00%. Adapun pada suhu 80°C, kadar air turun hingga 50,07%, menghasilkan penyusutan tertinggi sebesar 14,29%.

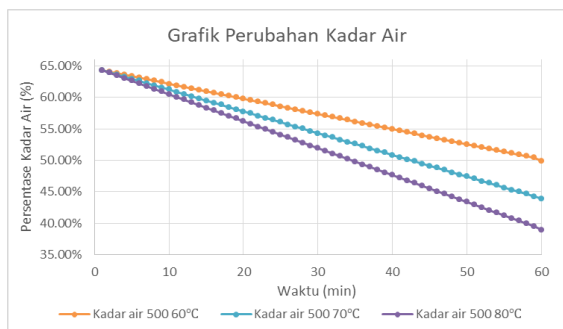
Grafik perubahan kadar air menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu udara pengering, semakin cepat laju pengurangan kadar air pada biji kopi. Penurunan yang lebih cepat pada suhu tinggi disebabkan oleh meningkatnya energi panas yang diterima oleh permukaan biji kopi, sehingga mempercepat proses penguapan air dari dalam biji menuju udara sekitar.



Gambar 11 Grafik kadar air 400 lpm

Berdasarkan grafik penyusutan kadar air kopi robusta pada debit udara 400 LPM terlihat bahwa terjadi penurunan kadar air secara bertahap seiring berjalannya waktu, baik pada suhu 60°C, 70°C, maupun 80°C.

Pada suhu 60°C, kadar air awal sebesar 64,36% mengalami penurunan hingga mencapai 52,17% dalam waktu 60 menit. Ini menunjukkan adanya penurunan kadar air sebesar 12,19%. Sementara pada suhu 70°C, kadar air turun lebih cepat, dari 64,36% menjadi 49,60% dengan total penyusutan sebesar 14,76%. Pada suhu tertinggi, yaitu 80°C, laju pengeringan meningkat signifikan, ditunjukkan oleh penurunan kadar air dari 64,36% menjadi 48,12%, atau terjadi penyusutan sebesar 16,24%.



Gambar 12 Grafik kadar air 500 lpm

Berdasarkan grafik penyusutan kadar air biji kopi robusta pada debit udara 500 LPM, terlihat bahwa proses pengeringan menghasilkan penyusutan kadar air yang semakin cepat seiring meningkatnya suhu udara pengering.

Pada suhu 60°C, kadar air awal sebesar 64,36% menurun secara bertahap menjadi 49,88% dalam waktu 60 menit. Ini menunjukkan adanya penyusutan kadar air sebesar 14,48%. Sementara pada suhu 70°C, kadar air menurun dari 64,36% menjadi 43,93%, dengan total penyusutan 20,43%. Penurunan paling signifikan terjadi pada suhu 80°C, di mana kadar air turun dari 64,36% menjadi 38,93%, dengan total penyusutan mencapai 25,43%.

Laju penurunan kadar air pada debit 500 LPM lebih cepat dibandingkan dengan debit 300 LPM dan 400 LPM. Hal ini terjadi karena peningkatan debit udara mempercepat laju konveksi panas dan membantu membawa uap air keluar dari ruang pengering dengan lebih efisien.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan melalui eksperimen menunjukkan bahwa variasi debit udara pengering memberikan pengaruh signifikan terhadap laju perpindahan panas dan percepatan proses pengeringan biji kopi robusta. Semakin besar debit udara yang digunakan, semakin cepat massa air pada biji kopi berkurang, karena aliran udara dengan debit tinggi mampu mempercepat proses konveksi panas dan mengeluarkan uap air secara lebih efisien. Selain itu, temperatur udara pengering juga berperan penting dalam meningkatkan laju perpindahan panas. Peningkatan suhu dari 60°C hingga 80°C terbukti memperbesar perbedaan suhu antara udara pengering dan biji kopi, sehingga mempercepat proses penguapan air. Kombinasi terbaik diperoleh pada debit udara 500 LPM dengan suhu 80°C, yang menghasilkan penurunan massa terbesar sebesar 534 gram dari massa awal 2.100 gram dengan kadar

air akhir mencapai 38,93%. Pada kondisi tersebut, laju perpindahan panas tertinggi tercatat sebesar 343 W, menandakan bahwa kombinasi suhu tinggi dan debit udara besar merupakan kondisi paling efektif untuk meningkatkan efisiensi proses pengeringan biji kopi robusta.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Frangga, S. Jahroh, and Y. H. Asnawi, "Robusta Coffee Marketing Channel Analysis Picking Rainbows and Picking Reds in Pagar Alam City," *Int. J. Res. Rev.*, vol. 10, no. 12, pp. 815–823, 2024, doi: 10.52403/ijrr.20231281.
- [2] M. Rohman, B. C. Tjiptady, P. Choirina, F. K. Asshidiqi, M. N. i. Humam, and M. R. Chanda, "Pemberdayaan Kelompok Tani Kopi Melalui Penerapan Mesin Sortir Otomatis Untuk Meningkatkan Produksi Pasca Panen," *J. Abdi Masy. Saburai*, vol. 4, no. 02, pp. 82–90, 2023, doi: 10.24967/jams.v4i02.2474.
- [3] Badan Standarisasi Nasional (BSN), SNI 01-2907-1999: Kopi Biji, Jakarta: BSN, 1999.
- [4] M. I. Dzaky, E. A. Kosasih, M. B. Fauzi, A. T. Prabowo, and A. Zikri, "Activation Energy Analysis of Coffee Beans Drying Using Double Condenser Refrigeration System," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2377, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2377/1/012058.
- [5] M. I. Dzaky, E. A. Kosasih, I. I. Hakim, and A. Zikri, "Investigation of Thin-Layer Drying of Coffee Beans Using a Double-Condenser Compression Refrigeration System: Effects of Air Mass Flux, Specific Humidity and Drying Temperature," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 106, no. 1, pp. 90–103, 2023, doi: 10.37934/arfmts.106.1.90103.
- [6] D. Kumaisyaroh and S. Bahri, "ANALISIS RANTAI MARKOV UNTUK PREDIKSI HASIL PRODUKSI TANAMAN KOPI DI PROVINSI SUMATERA SELATAN Markov chain Analysis for Prediction of Coffee Crop Production in South Sumatera Province," *J. Mat. Statiska dan Ter.*, vol. 02, no. 02, pp. 125–134, 2023, <https://doi.org/10.30598/parameterv2i02pp125-134>.

- [7] V. Holman, *Heat Transfer*, vol. 15, no. 3. 1999. doi: 10.1080/01973762.1999.9658510.
- [8] T. Rokhman, “Menghitung Koefisien Perpindahan Panas Konveksi.” [Online]. Available: <https://taufiqurrokhman.wordpress.com/tag/prandtl/>.
- [9] Setijahartini, S. 1985. *Pengeringan Agro Industri*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- [10] Firdaus, Aneka. 2016. *Perancangan dan Analisa Alat Pengering Ikan dengan Memanfaatkan Energi Briket Batubara*. Palembang: Universitas Sriwijaya. <https://dx.doi.org/10.22441/jtm.v5i4.1216>.
- [11] S. S. T. Gultom, H. Ambarita, M. S. Gultom, dan F. H. Napitupulu, “Rancang Bangun dan Pengujian Pengering Biji Kopi Tenaga Listrik dengan Pemanfaatan Energi Surya,” *Jurnal Dinamis*, vol. 7, no. 4, pp. 11–20, Des. 2019. <https://doi.org/10.32734/dinamis.v7i4.7201>.

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN TROLI KAPASITAS 240 KG GUNA MEMPERSINGKAT WAKTU PENCUCIAN, PELAPISAN, DAN DISTIBUSI *PART WEDGES* TYPE D6 PADA PT. UMA

Oktavianus Ardhian Nugroho^{1*}, Y.B. Adyapaka Apatya², Dimas Bagus Dwiyantoro³, Phillips Dede Kurniawan⁴

¹ Program Studi Mesin Industri, Politeknik Industri ATMI

Jl. Kampus Hijau No. 3 Kawasan Jababeka Education Park, Jl. Raya Lemahabang, Simpangan, Kec. Cikarang Utara, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat 17520

ardhianatmi@gmail.com ¹

Abstrak

PT. Ultimax Mitra Agung Indonesia (PT. UMA) merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang *quality control*. Proses pengendalian mutu produk yang menjadi bagian penting dalam sistem produksi perusahaan ini. Salah satu produk yang dibuat dan dijaga kualitasnya adalah *part wedges* tipe D6. Proses pencucian dan pelapisan *wedges type D6* harus wajib dilakukan sebelum part mulai di *assembly*. Selama ini proses yang dilakukan masih secara manual. Proses distribusi box menjadi yang paling krusial karena masing-masing box memiliki berat 30 kg/box dan proses ini dilakukan secara berulang. Hal ini berpotensi menimbulkan kelelahan fisik dan risiko cendera selain itu PT UMA menganggap proses ini tidak efektif dan efisien. Oleh sebab itu, tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membuat sebuah troli berkapasitas 240 kg yang mampu membawa enam box *wedges*. Proses pencucian dengan solar dan pelapisan dengan oli, yang sebelumnya dilakukan manual di bak pencuci sekarang bisa dilakukan di atas troli. Dengan troli hasil rancangan tidak hanya mempercepat proses pencucian dan pelapisan, tetapi juga mempermudah tahapan selanjutnya, yaitu proses distribusi *wedges* ke area *assembly*. Mekanisme penuangan *wedges* pada troli dibuat menggunakan sistem katrol sehingga memudahkan pengeluaran *wedges* dari box secara efektif. Selain itu, untuk *safety* troli ini dilengkapi dengan absorber sebagai sistem peredam. Dari hasil rancangan dan pengujian menunjukkan bahwa troli berfungsi dengan baik, kokoh menahan beban, dan mampu meningkatkan ke-efektifitasan para operator bekerja, di mana sebelumnya proses ini membutuhkan waktu 40 menit 34 detik / 240 kg berubah menjadi 21 m 8 detik / 240 kg. Selain troli didesain dengan bentuk mengikuti prinsip ergonomi sehingga tingkat keselamatan dan kenyamanan operator meningkat.

Kata kunci : troli, *wedges* D6, pencucian, pelapisan, distribusi, keselamatan kerja, ergonomi.

Abstract

PT. Ultimax Mitra Agung Indonesia (PT. UMA) is a company engaged in the field of *quality control*. The product *quality control* process is an important part of the company's production system. One of the products manufactured and maintained for quality is the D6 type *wedges*. The washing and coating process for D6 type *wedges* must be carried out before the parts are assembled. So far, the process has been carried out manually. The box distribution process is the most crucial because each box weighs 30 kg and this process is repeated multiple times. This has the potential to cause physical fatigue and risk of injury. In addition, PT UMA considers this process to be ineffective and inefficient. Therefore, the purpose of this study is to design and create a trolley with a capacity of 240 kg capable of carrying six boxes of *wedges*. The washing process with diesel and coating with oil, which was previously carried out manually in a washing tank, can now be done on the trolley. With the designed trolley, the process not only speeds up washing and coating but also facilitates the next stage, namely the distribution of *wedges* to the assembly area. The mechanism for pouring *wedges* onto the trolley is made using a pulley system, making it easier to remove *wedges* from the boxes effectively. In addition, for safety, this trolley is equipped with an absorber as a damping system. The results of the design and testing showed that the trolley functions well, is sturdy in bearing loads, and can increase the effectiveness of operators' work, where previously this process took 40 minutes 34 seconds / 240 kg, it has changed to 21 minutes 8 seconds / 240 kg.

Furthermore, the trolley is designed in a shape that follows ergonomic principles, improving both the safety and comfort of the operator.

Key words : weld points, king cross and taguchi methods.

PENDAHULUAN

Secara umum pada dunia industri modern, efektivitas dan efisiensi operasional menjadi faktor utama dalam meningkatkan produktivitas. PT. Ultimax Mitra Agung Indonesia (PT. UMA) adalah perusahaan manufaktur yang memiliki hasil produksi seperti wedges pada konstruksi jembatan. Dalam Perusahaan ini hasil produksi mereka akan dikelola pada *warehouse* untuk nantinya masuk ke tahap berikutnya. Oleh karena itu, untuk mendukung aktivitas di dalam *warehouse*, penggunaan alat bantu kerja dibutuhkan untuk berfungsi meringankan beban kerja operator, mempercepat proses logistik, serta mengurangi risiko kelelahan fisik dan cedera. Cedera seperti nyeri punggung, cedera otot, sampai penyakit kronis lainnya yang dapat memengaruhi produktivitas dan mengurangi tingkat keselamatan kerja operator di PT. UMA. Oleh karena hal tersebut PT. UMA dalam proses pengelolaan *warehouse*nya membutuhkan alat bantu agar part hasil produksi dapat dengan efektif dikelola untuk proses berikutnya.

Seperti yang sudah diketahui troli adalah salah satu solusi untuk memudahkan proses pemindahan part agar lebih efisien dan efektif, dengan troli masalah Kesehatan terutama pada pekerja dapat dikurangi. Dengan begitu perusahaan dan pekerja tidak perlu khawatir masalah *safety* ketika bekerja. Penelitian tentang rancangan troli sebelumnya pernah di buat oleh Sokhibi [1] dalam penelitiannya perancangan troli untuk aktivitas pengangkutan beras di penggilingan padi, dengan data antropedi pekerja berhasil membuat sebuah troli pengangkut beras yang nyaman dan aman. Kekurangan dari alat yang dibuat adalah troli yang dibuat tidak diperuntukkan untuk beban yang tinggi dan hanya menurunkan beban pada lengan saja.

Penelitian lain oleh Maria S A [2] misalnya dalam penelitiannya berjudul perancangan troli galon berbasis *ergonomic function deployment* berhasil membuat troli untuk mengantar galon air melewati anak tangga. Dari hasil rancangannya penggunaan metode EFD pada troli nilai produktivitas jumlah pengantaran galon meningkat 67,54 %, tetapi dalam bentuk perancangannya mekanisme penurunan galon masih manual dan bisa menimbulkan cedera pada pekerja. Penelitian lain tentang pembuatan troli dibuat oleh

Aulina A N [3] pada rancangan trolinya masih berupa troli yang mempertimbangkan *antropometri* dan prinsip *ergonomic*, tetapi evaluasi material, kemudahan operasi alat, dan kapasitas masih rendah. Penelitian tentang modifikasi troli untuk spesifikasi kebutuhan pernah dilakukan oleh Doni R [4] dalam rancangannya troli yang dibuat dimodifikasi dengan *wireless camera* yang dapat ditampilkan pada *smartphone* dan *goggles* sehingga pergerakan troli bisa di atur dari jarak jauh sehingga mengurangi risiko cedera dari penggunaannya. Kekurangan dari troli jenis ini masih pada maksimal beban yang dikenakan dan sistem ini terlalu mahal untuk diterapkan di industri.

Pada penelitian ini PT. UMA membutuhkan sebuah troli yang bisa mendukung proses produksi mereka menjadi lebih efektif. Part yang dipindahkan adalah *wedges* tipe D6. *Wedges* [4] Ada banyak *styles* jangkar dan *wedges* (baji) yang berbeda untuk berbagai aplikasi dan rentang beban. Beberapa *wedges* dibagi menjadi tiga bagian, sementara yang lain dibagi menjadi dua bagian. Pengaturan *wedges* dan angkor yang digunakan bergantung pada penerapan sistem. Biasanya keduanya dipakai untuk proses sistem penjangkaran [5, 6] atau *anchorage* di mana *wedges* yang berfungsi mengunci tendon baja ketika ditarik, gambar 1 menunjukkan sistem *anchorage*.



Gambar 1. Sistem *anchorage* [4]

Untuk *wedges* sendiri biasanya terdiri dari tiga bagian yang dirancang untuk mencengkeram tendon secara mekanis, memastikan gaya prategang tetap terjaga. Sistem ini telah digunakan secara luas dalam konstruksi jembatan prategang. Gambar 2 menunjukkan bentuk *wedges* tipe D6 yang diproduksi oleh PT. UMA.



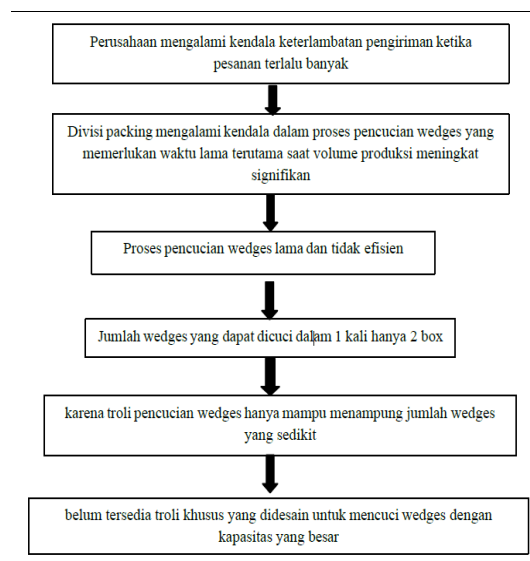
Gambar 2. Bentuk wedges

Proses pemindahan *part wedges* dari gudang menuju proses *assembly* membutuhkan beberapa tahapan. Troli yang dibuat juga tidak hanya memiliki kaidah prinsip ergonomis yang benar, tetapi juga dilengkapi proses pencucian, pembersihan, dan pengiriman part. Oleh karena itu, troli yang dibuat harus dilengkapi dengan mekanisme pengangkutan dan penuangan part secara cepat dan aman. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membuat troli pencucian *wedges* dilengkapi dengan crane pengangkat box *wedges* untuk mendukung proses produksi di lingkungan *warehouse* PT. UMA. Alat ini dirancang agar mampu meminimalkan keterlibatan tenaga manusia secara langsung dalam mengangkat beban berat sehingga dapat mengurangi risiko cedera otot dan tulang akibat aktivitas manual handling yang berlebihan. Troli yang dirancang dan dibuat berdimensi ukuran panjang 1110 mm, tinggi 1650 mm, lebar 720 mm. Selain itu, berat maksimal troli ini sebesar 240 kg.

METODE PENELITIAN

Dalam proses perancangan dan pembuatan alat ini proses identifikasi masalah dilakukan di PT UMA, dengan menggunakan metode 5 why analisis [7, 8]. Metode ini digunakan untuk membuat bak troli penampung *wedges* yang menampung 6 box disertai dengan mekanisme pengangkatan beban, pencucian, distribusi, dan penuangan *wedges*. Pembuatan troli dilatar belakangi PT UMA yang ingin mengutamakan safety point pada proses pengangkutan benda *wedges* disertai dengan kemudahan mencuci dan melumasi *Wedges*. Bentuk *flowchart 5 Whys Analysis*, untuk mengidentifikasi masalah ditunjukkan pada gambar 3. Gambar 3 menunjukkan permasalahan utama yang pada PT UMA hasil simulasi di bengkel menunjukkan proses pencucian *wedges* masih kurang maksimal karena pertama kapasitas pencucian hanya di angka 90 kg atau 3 box dalam

satu kali pencucian, selain itu proses total yang muncul dari simulasi menunjukkan waktu total 40 menit 34 detik untuk 1 kali proses.



Gambar 3. Flowchart 5 Whys Analysis

Proses Observasi dan Identifikasi Lapangan

Dari hasil identifikasi di PT UMA dengan menggunakan metode 5 why analisis diketahui bahwa proses pengiriman dari Gudang ke meja *assembly* memakan waktu yang lama, selain itu operator membutuhkan waktu dan energi yang banyak karena mereka harus mengulang kegiatan yang sama secara manual dan berulang-ulang. Pada gambar 4 a menunjukkan sistem pengangkutan manual dan gambar 4 b menunjukkan sistem penuangan manual.



Gambar 4. a. Pengangkutan box manual dan b. Penuangan box manual

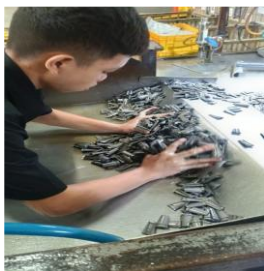
Proses manual yang sebelumnya dilakukan di PT UMA mempunyai waktu total 40 menit 34 detik. Proses tersebut dibagi menjadi 3 tahap, tahapan-tahapan tersebut, berikut tahapan tahapan pengukuran waktu menggunakan alat ukur stopwatch: Pertama proses distribusi dan penuangan manual ke bak cuci, proses ini dilakukan dengan mengikuti berat total bak penampung 90 kg.

Jika total wedges yang dicuci harus 240 kg, maka total waktu menjadi 3 kali lipatnya menjadi 4 menit 10 detik. Sebagai catatan proses awal ini bak pencuci dan posisi wedges baru hanya berjarak 1 meter sehingga waktu penuangan dan distribusi menjadi cepat. Tetapi kemudian karena banyak kejadian tergelincir di daerah bak, maka posisi bak pencuci dipindahkan sejauh 24 meter dari meja *assy*. Kedua proses berikutnya adalah proses pencucian sebelum wedges distribusi ke meja *assy*, sebelumnya wedges harus dicuci dan dilapisi oli terlebih dahulu sebelum dipindahkan ke meja *assembly*. Proses pencucian dilakukan, karena wedges masih membawa lapisan bawaan dari proses sebelumnya sehingga harus dibersihkan terlebih dahulu karena ber-racun. Proses pengisian menggunakan pompa berkapasitas 10 liter per menit. Gambar 5 menunjukkan proses pencucian wedges dengan media cairan solar.



Gambar 5. Proses pencucian wedges

Pada proses ini berlangsung waktu yang dibutuhkan adalah 10 menit 8 detik. Prosesnya berupa 4 menit 28 detik pengisian dan pembuangan cairan solar, dan 5 menit 40 detik untuk oli. Karena kapasitas bak 90 kg, maka proses pencucian ini dilakukan sebanyak 3 kali sehingga waktu pencucian dan pelumasan total menjadi 30 menit 24 detik. Proses pelumasan dengan oli bertujuan untuk meningkatkan ketahanan karat. Ketiga setelah proses pencucian dan pelumasan selanjutnya adalah mendistribusikan wedges ke meja *assy*. Pada proses ini wedges dituangkan ke meja secara manual. Proses menuangkan wedges kedalam meja *assy*, dilakukan dengan cara mendorong wedges ke meja.



Gambar 6. Proses pencucian wedges

Gambar 6 menunjukkan proses pencucian manual yang dilakukan operator di PT UMA. Dari gambar 6 menunjukkan kerap kali operator menggunakan tangan secara langsung yang menyebabkan tangan terluka karena tersayat dengan ulir wedges. Proses penuangan dilakukan selama 2 menit. Karena kapasitas dari meja *assy* sebesar 240 Kg, maka alur dari proses ini mengalami pengulangan sebanyak 3 kali dengan total wedges 240 Kg, maka didapat waktu total 6 menit. Sebelumnya pembuatan tabel parameter [9] dilakukan untuk merangkum parameter ketidak efektifan proses. Tabel 1 menunjukkan hasil penghitungan pengukuran waktu pencucian, pelapisan, dan distribusi wedges menggunakan alat ukur stopwatch.

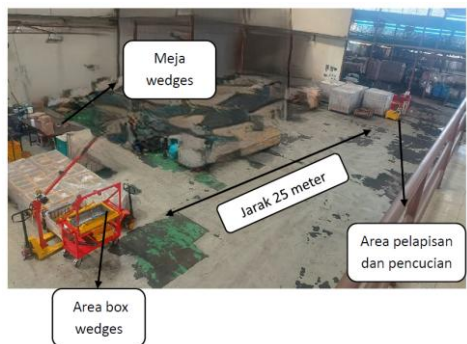
Tabel 1. Tabel parameter dan waktu proses manual

No	Parameter Proses	Waktu Proses
1	Pengangkatan + distribusi wedges	4 menit 10 detik
2	Pencucian dan pelumasan wedges	30 menit 24 detik
3	Waktu jalan + Penuangan wedges	6 menit
Total estimasi waktu		40 menit 34 detik

Selain itu, karena kapasitas bak manual terbatas dan jika dibiarkan hal ini akan masalah jika permintaan wedges meningkat dan proses di atas akan menjadi *bottleneck* [10] terhadap proses produksi di PT UMA.

Desain Troli Cleaner

Tahapan perancangan dibuat sesuai dengan kekurangan yang muncul di tabel 1, maka proses desain didasarkan pada kekurangan yang sudah diketahui. Perancangan troli dilakukan karena posisi area box wedges ke bak pencuci yang berubah menjadi 24 meter, hal ini disebabkan karena banya operator yang tergelincir. Bentuk desain troli dibuat menjadi 3 variasi bentuk, variasi ini menyesuaikan permintaan dari pihak PT UMA di mana kapasitas yang tadinya 90 kg menjadi 240 kg sekali jalan, selain itu kemudahan penuangan di menaikkan juga diperhatikan. Hal lain yang diperhatikan adalah troli harus bisa mendistribusikan wedges dari meja wedges ke area pencucian dan terakhir ke meja *assy* dengan cepat. Gambar 7 menunjukkan area pabrik PT UMA, pada gambar 7 ditunjukkan jarak yang harus ditempuh sejauh 25 meter + 25 meter + 14 meter, maka totalnya adalah 64 meter.



Gambar 7. Denah area *box wedges* dan pencucian serta pelapisan *wedges*

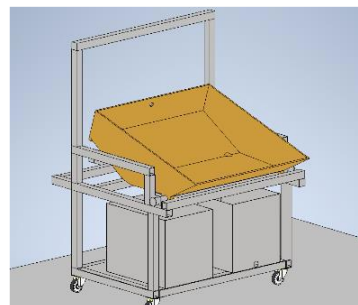
Maka dari itu troli yang dirancanglah sebuah troli yang memiliki kemampuan mencuci dan membawa *wedges*. Desain dibuat menggunakan tools matrix morfologi untuk menghasilkan variasi desain [11-14]. Tabel 2 menunjukkan bentuk tabel matrix morfologi dari setiap variasi desain.

Tabel 2. Tabel matrix morfologi

NO	Sub Fungsi	Alternatif A	Alternatif B
1	Bentuk Bak penampung	 Pelat besi	 Drum bekas
2	Sistem angkat	 Manual	 Katrol
3	Posisi Bak penampung oli dan solar	 Langsung pada rangka	 Terpisah
4	Posisi Poros	Di ujung Bak penampung	Di tengah bak penampung

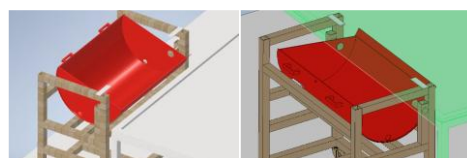
Dari tabel 2 didapatkan 3 variasi desain, desain pertama dengan variasi 1A-2B-3A-4B ditunjukkan pada gambar 1, di mana mempunyai kelebihan praktis karena bak oli dan solar sudah berada dalam troli, mekanisme penuangan masih manual dengan cara mengangkat menggunakan

katrol dan menggunakan poros di tengah sehingga bearing menciptakan efek jungkat jungkit sehingga part *wedges* dapat turun menggunakan gaya gravitasi. Kekurangannya biaya mahal di pembuatan bak penampung dan beban terlalu berat karena minyak dan oli berada pada 1 troli.



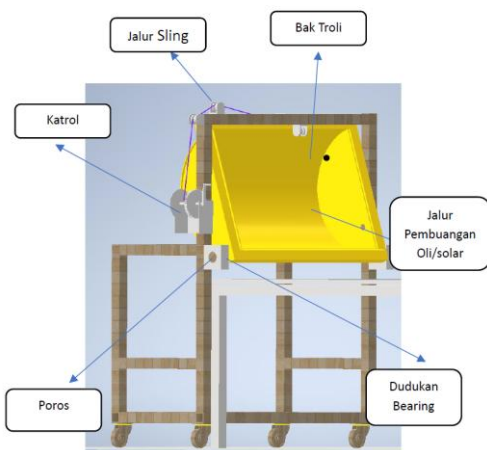
Gambar 8. Variasi troli 1

Variasi kedua 1B-2A-3B-4A merupakan penyempurnaan dari variasi 1 di mana bak penampung yang digunakan dibuat dari bahan tong oli bekas yang dipotong menjadi 2 bagian dan ditumpuk, hal ini menyebabkan biaya pembuatannya menjadi lebih murah dan proses pembuatan menjadi lebih cepat. Posisi bak oli dan solar sudah tidak berada pada troli sehingga membuat menjadi lebih ringan dari variasi 1. Kekuangannya ternyata besar torsi yang muncul ketika proses penuangan dengan cara manual terlalu berat sehingga perlu alat tambahan agar mempermudah. Gambar 9 menunjukkan bentuk variasi 2 dengan bak yang menggunakan bahan bekas sebagai bak penampung.



Gambar 9. Variasi troli 2

Variasi ketiga 1B-2B-3B-4A merupakan penyempurnaan dan modifikasi dari variasi 2 di mana bentuk bak penampung masih sama, tetapi mekanisme penuangan dibuat menggunakan sistem katrol. Dengan menggunakan sistem katrol, maka proses penuangan menjadi lebih mudah. Gambar 10 menunjukkan bentuk variasi 3 yang sudah dilengkapi dengan sistem katrol.



Gambar 10. Variasi troli 3

Variasi 3 pada gambar 10 menjadi variasi final, Bentuk yang sudah dibuat ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Bentuk variasi 3 yang sudah dibuat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian dilakukan dengan tes kemampuan mesin. Tes ini dilakukan terhadap troli variasi 3. Jenis tes dipakai kualitas untuk mengetahui kemampuan mesin dalam memenuhi permintaan dari PT UMA. Pengujian yang dilakukan meliputi 1. pengujian fisik, meliputi berat alat, ukuran/ dimensi alat, 2. pengujian fungsional, meliputi pengecekan fungsi pencucian dan fungsi penuangan, 3. Pengujian ketahanan, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui daya tahan troli yang sudah dibuat, 4. Pengujian performa meliputi waktu pemakaian dan kondisi fisik operator [14].

Pengujian Fisik Troli

Hasil pengujian fisik variasi 3 dilakukan untuk menentukan bentuk dimensi dan berat. Dengan memodifikasi bagian seperti bak

penampung dan pemilihan rangka maka berat dari troli dapat dikurangi. Tabel 3 menunjukkan *properties* fisik variasi 1 hasil rancangan. Dari tabel 3 menunjukkan berat troli tanpa beban harus dibuat tidak melebihi 250 kg sesuai harapan *costumer* dalam hal ini PT UMA.

Tabel 3. Tabel *properties* fisik troli variasi 3

No	Properties Fisik Troli	Satuan
1	Dimensi	1,1 x 1,65 x 0,72 meter
2	Kapasitas total	110 Liter
3	Tanpa beban	214 Kg
4	Dengan beban wedges + 240 Kg	454 Kg

Dimensi pada tabel 3 tidak menggunakan *safety factor* karena rangka yang digunakan SNI 7394 yang memiliki ukuran 5 x 5 cm dan tebal 4 mm dengan tegangan luluh 345 Mpa sehingga nilainya dianggap memiliki *safety faktor* yang tinggi.

Pengujian Fungsional Troli

Hasil pengujian fungsi troli dapat dipakai dengan baik dan lancar. Ada 2 buah alat bantu yang dibuat untuk melengkapi kinerja dari troli, yang pertama adalah *crane* pengangkat dan kedua adalah stasiun pencucian yang berisi oli dan solar. Gambar 12 menunjukkan bentuk dan hasil jadi dari *crane* pengangkat. Dan gambar 13 menunjukkan stasiun pencuci yang berisi bak penampung dilengkapi pompa untuk oli dan solar.



Gambar 12. Bentuk Crane



Gambar 13. Stasiun pencuci berisi box oli dan crane

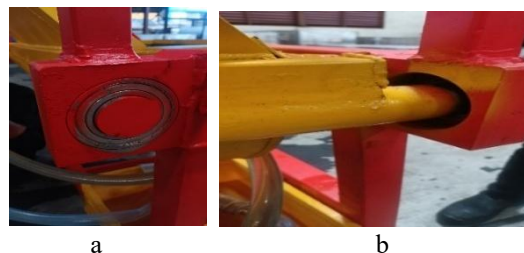
Stasiun oli dan solar menggunakan pompa sehingga mempercepat waktu pencucian wedges. Tabel 4 menunjukkan hasil tes fungsional troli, apakah troli berfungsi dengan baik atau tidak. Tes yang dilakukan adalah 1. Tes fungsi pengangkut 240 kg, 2. Tes pencucian wedges, 3. Tes penuangan 240 kg wedges ke meja assy dengan mekanisme katrol.

Tabel 4. Hasil tes fungsional troli

Tipe pengujian	Hasil Fungsional	Keterangan
Pemberian beban 240 Kg	Berhasil	Tidak ada rangka yang bengkok dan roda penyangga tetap aman
Pencucian pertama dengan solar	Berhasil	Solar yang masuk kedalam bak dan keluar kedalam bak dengan lancar dan tidak bocor
Pencucian ke 2 dengan oli	Berhasil	Oli dapat merendam seluruh bagian wedges yang bervolume 110 liter
Penuangan	Berhasil	Sistem katrol bekerja dengan baik.

Pengujian Ketahanan Troli

Untuk meningkatkan ketahanan troli maka Pemilihan material rangka troli adalah hal penting yang perlu diperhatikan, karena dengan memilih material yang tepat alat atau benda yang dibuat mampu digunakan dengan baik. Beberapa bagian dari troli dipilih secara khusus seperti : Pertama poros penyangga hasil penghitungan diameter minimal menggunakan persamaan diameter minimal poros dengan momen lentur di 595608 Nm dan momen torsi 636669 Nm didapat besar diameter minimal poros menggunakan material 40 Cr sebesar 17.9 mm. sedangkan diameter pada desain sebesar 50 mm. Dimensi poros yang dibuat memiliki diameter 50 mm dengan panjang 1110 mm. Dimensi poros cukup untuk menahan beban total dari bak saat kondisi kosong maupun bak saat berisikan wedges. Gambar 14 menunjukkan gambar poros dan bearing yang dipakai untuk rancangan troli ini. Untuk bearing bearing yang dipakai menggunakan seri 6210 ZZ [15] bearing ini sudah banyak tersedia di PT.UMA. bearing ini mampu menahan maksimal beban di 23,2 kN. Jika dilihat sekilas dari beban kerjanya. Berat poros disertai bak dan beban dikisaran 255 kgf. Sehingga untuk penghitungan masa pakai bantalan pada beban kerja 23,2 kN tidak dilakukan karena dianggap sudah *over construction*.



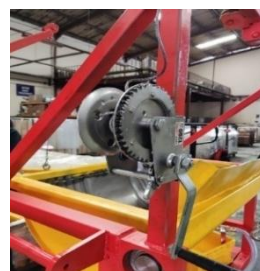
Gambar 14. Bentuk bearing dan poros dari troli.

Kedua adalah pemilihan roda dimana roda yang dipakai pada troli dipikih roda dengan diameter 6 inci, dilengkapi dengan 2 rem dan kapasitas 150 kg per roda. Dari pemilihan roda dipastikan akan tahan lama karena setiap roda hanya dikenakan beban 113 kg. dan yang ketiga adalah mekanisme katrol, dari hasil pengukuran didapatkan bahwa beban yang muncul pada ujung bak yang dipasang handel katrol adalah sebesar 13 kg tanpa beban dan 155,56 kg dengan beban wedges total 240 Kg. dikarenakan tidak adanya percepatan pada waktu penuangan maka gaya yang dibutuhkan Adalah 155,56 kgf. Selanjutnya Gambar 15 menunjukkan proses pengukuran tanpa beban wedges dan menunjukkan besar beban 13 kg atau 13 kgf.



Gambar 14. Proses pengukuran beban tarik bak

Untuk beban 155,56 kgf maka spesifikasi katrol yang dipakai sebagai berikut: berat katrol 3000 Gram, berbahan *galvanized* Anti-Karat dan ringan, kapasitas *pull* / tarik sebesar 540 kgf, memiliki gear ratio 4 :1, *handle length* sepanjang 225 mm, dan ukuran *cable* 4,2 mm di diameter dan 10 m di panjang. Gambar 16 menunjukkan sistem katrol yang dipakai di troli.



Gambar 16. Sistem Katrol Pada Troli

Dengan beban 155,56 kgf di ujung pengkait katrol maka dengan rasio 4:1 besar beban yang dirasakan ketika memutar katrol hanya sekitar 38,89 kgf. Dari semua part yang dibuat menggunakan spesifikasi yang tinggi sehingga dipastikan troli memiliki ketahanan yang tinggi.

Pengujian Performa Troli

Hasil pengujian performa troli meliputi sistem ergonomic troli, *safety*, dan waktu pemakaian. Untuk sistem ergonomic desain 1. Tinggi tuas katrol berada pada kisaran 110 cm dari permukaan lantai. Tingi rata-rata operator 165 cm Gambar 17 menunjukkan posisi operator ketika menggunakan troli.



Gambar 17. Posisi postur tubuh operator saat memegang troli.

Pada gambar 17 dan 18 untuk operator berdiri tinggi badan 165 cm, ketinggian 110 cm untuk pegangan/tuas biasanya berada di sekitar tinggi sikut-bahu bawah bagi banyak orang dengan tinggi tersebut. Artinya: pegangan 110 cm cenderung agak tinggi dibandingkan posisi pegangan yang ideal untuk dorong/ tarik yang nyaman (yang biasanya sekitar tinggi pinggang sedikit di bawah atau sejajar sikut tergantung tugas). Maka tinggi tuas 110 cm bisa diterima untuk operator 165 cm, tetapi bukan posisi optimal untuk semua individu akan lebih cocok untuk operator yang lebih tinggi dari 170 cm.



Gambar 18. Posisi operator menggunakan tuas katrol.

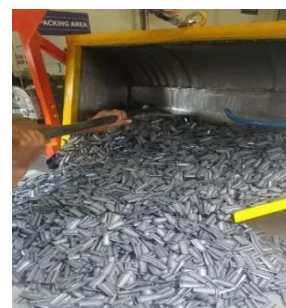
Untuk perhatian terkait dengan keselamatan [16-18] *safety* menggunakan pada

bagian bawah bak antara bak dan rak troli dipasang absorber khusus yang berfungsi sebagai peredam benturan. Selain melindungi struktur troli, meredam suara, dan melindungi operator dengan mencegah potensi terjepit. Gambar 19 menunjukkan bentuk dan posisi absorber yang dipasang pada troli.



Gambar 19. Posisi absorber pada troli.

Desain bak penampung memiliki sudut kemiringan dan dioeraskan menggunakan katrol, sehingga operator dapat mengakses bagian dalam bak untuk mencuci atau menuang wedges tanpa harus membungkuk dalam-dalam. Posisi ini sudah sesuai dengan prinsip ergonomi kerja berdiri, yakni kemiringan maksimum 90° untuk akses kerja. Selain itu resiko cedera tangan dapat dikurangi. Gambar 20 menunjukkan proses penuangan wedges dari troli.



Gambar 20. Proses penuangan wedges dari troli.

Untuk penghitungan waktu penggunaan troli ini terhitung lebih mudah daripada proses manual sebelumnya. Proses manual sebelumnya memerlukan waktu 40 menit 34 detik sedangkan dengan menggunakan troli terbaru waktu prosesnya menjadi 21 m 8 detik. Tabel 5 menunjukkan perbandingan kecepatan proses cara manual dan dengan troli pencuci yang baru.

Tabel 5. Hasil tes performa troli

Keterangan	Manual	Waktu	Troli Terbaru	Waktu
Pengangkatan	Manual	4 m 10 detik	Crane	5 menit
Jumlah Box	3 box	-	8 box	-
Kapasitas	90 kg	-	240 kg	-

Keterangan	Manual	Waktu	Troli Terbaru	Waktu
Pencucian 80 lt solar + 240 kg	-	13 m 24 detik	110 lt	4 m 28 detik
Pencucian 80 lt oli + 240 kg	-	17 m	110 lt	5 m 40 detik
Perjalanan	24 m	0	64 meter	5 m
Penuangan	Manual	6 m	Sistem Katrol	1 m
Total Waktu		40 m 34 detik		21 m 8 detik

KESIMPULAN

Berdasarkan observasi di lapangan dan survei terhadap karyawan di PT Ultimax Mitra Agung (PT UMA), dapat disimpulkan bahwa fungsi dari Proyek Troli yang dibuat sudah memenuhi kriteria yang dibutuhkan dan juga sudah berhasil membantu operator serta mengurangi resiko cedera. Cara kerja dari Troli ini juga mudah digunakan dan dipahami oleh operator sehingga tidak menyulitkan penggunaannya. PT UMA juga mengapresiasi troli yang dibuat karena dapat meningkatkan waktu proses pencucian dan pelapisan wedges seperti kapasitas wedges yang diolah yang sebelumnya 90 kg menjadi 240 kg, sedangkan dari sisi waktu dari sebelumnya 40 menit 34 detik menjadi 21 m 8 detik, total efisiensi waktu mencapai 47,9 %. Tingkat resiko kecelakaan kerja berkurang dikarenakan tidak ada lagi operator yang mengangkat box 30 kg secara manual, sehingga resiko cedera menurun, posisi box oli dan solar yang diberikan area khusus juga mengurangi cedera terpeleset. Untuk *maintenance* sangat mudah karena operator hanya perlu mengganti oli dan juga solar pencuci secara rutin setiap 10 hari. Untuk proses perbaikan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya akan dilakukan perhitungan struktural (perhitungan manual atau FEA) untuk rangka, sambungan, dan las pada beban maksimum dengan faktor keamanan yang sesuai, selain itu Penilaian RULA & REBA dari troli hasil rancangan sehingga diharapkan troli dapat berfungsi lebih optimal, aman, dan nyaman jika digunakan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sokhibi, M. A. Alifiana, and M. I. Ghozali, "Perancangan Troli Ergonomi pada Aktivitas Pengangkutan Beras di Penggilingan Padi," vol. 2, no. 2, p. 111, 2018.
- [2] M. S. Anggraini and H. I. Setiawan, "Perancangan Troli Galon Berbasis Ergonomic Function Deployment (EFD)," vol. 4, no. 1, pp. 20-28, 2022.
- [3] A. A. Nashida, D. A. Nuriyadi, N. S. Prameswari, I. P. Senthika, Z. N. Rahma, and R. A. Imran, "Perancangan Troli Ergonomis sebagai Alat Bantu Angkut Karung dengan Quality Function Deployment pada Penggilingan Padi Sri Rezeki di Banyumas," vol. 8, no. 1, pp. 60-69, 2024.
- [4] P. C. McAlpine, *Evaluation of the Effect of a Modified Wedge Geometry on the Behavior of Mono-Strand Post-Tensioning Anchorages*. Villanova University, 2014.
- [5] M. S. SYAFUADTUDDIN, "TINJAUAN PELAKSANAAN KONSTRUKSI PEKERJAAN STRUKTUR BOX GIRDER BALANCE CANTILEVER DENGAN METODE FORM TRAVELER PADA PROYEK PEMBANGUNAN JEMBATAN OGAN TOL KAYU AGUNG PALEMBANG BETUNG," 2021.
- [6] R. F. Ardhi and O. A. Putra, "ANALISIS LOSS OF PRESTRESS PCI GIRDER AKIBAT METODE POST TENSION SINGLE STRESSING PADA PROYEK JEMBATAN DAN JALAN X KARAWANG STA 0+ 225-0+ 300," vol. 5, no. 1, pp. 93-102, 2025.
- [7] A. J. J. B. q. Card and safety, "The problem with '5 whys'," vol. 26, no. 8, pp. 671-677, 2017.
- [8] A. R. Ardiansyah, G. Anindita, M. Dhani, Health,, and E. Engineering, "Penerapan Metode Double Ishikawa dan 5 Whys Analysis Dalam Analisis Kecelakaan Loading Unloading Billet Baja," vol. 3, no. 1, pp. 66-73, 2025.
- [9] C. B. K. Sampurno, O. A. Nugroho, and R. C. E. Putri, "OPTIMASI KINCIR AIR TIPE

- UNDERSHOT: PENGARUH JUMLAH SUDU DAN KETINGGIAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN EKSPERIMENTAL: Bahasa Indonesia," vol. 10, no. 1, pp. 14-20, 2024.
- [10] Y. Eddy, "Penyelesaian Penyebab Bottle Neck Article SOT 2875 Pada Proses Join Collar di PT Ameya Livingstyle Indonesia," vol. 3, no. 1, pp. 51-55, 2020.
- [11] O. A. Nugroho, K. Y. Antonio, and G. J. M. J. T. M. Purwanto, "Perancangan dan Pembuatan Mesin Grinda Mantis Chip (GMC) Untuk Mengoptimalkan Proses Pengrindaan Chip Di PT. Promanufacture Indonesia," vol. 16, no. 02, pp. 154-162, 2024.
- [12] O. A. Nugroho, I. A. Putra, A. W. C. Purnomo, and Y. I. Sarjono, "Rancang Bangun Mesin Crusher Bahan Nillon A402 Untuk Proses Daur Ulang di PT. Pandrol Indonesia," vol. 7, no. 2, 2024.
- [13] A. W. C. Purnomo, O. A. Nugroho, and E. D. J. M. J. T. M. Septiawan, "Metode Matrix Morfology Untuk Perancangan Bangun Alat Perakit Knob Switch Assy Electric Park Brake Module," vol. 15, no. 01, pp. 64-73, 2023.
- [14] O. A. Nugroho, Y. A. Apatya, F. O. S. P. Tukan, and Y. Sakti, "The Robot Design Rancang Bangun Robot Pembersih Solar PV Dengan Sistem Pengendali Nirkabel," vol. 14, no. 2, pp. 181-188, 2023.
- [15] Y. Yang, H. Liu, H. Ma, P. Wang, Q. Han, and B. J. T. I. Wen, "Experimental study on vibration characteristics due to cage damage of deep groove ball bearing," vol. 185, p. 108555, 2023.
- [16] D. Ginanti, "STRUCTURE DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF CHILD SEAT FOR MOTORCYCLE," vol. 7, no. 1, pp. 38-45, 2021.
- [17] J. Kivistö-Rahnasto, "Machine safety design," vol. 4, no. 1, p. 1, 2000.
- [18] E. Bluff, "Safety in machinery design and construction: Performance for substantive safety outcomes," vol. 66, pp. 27-35, 2014.

DAMPAK KEBOCORAN RISER WALL TUBE TERHADAP PRODUKSI ENERGI DAN KERUGIAN KWH PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK: STUDI KASUS PLTU XYZ UNIT 1

Muhammad Facheruddin BJ¹, Muhammad Ikram Kido¹, Muhammad Zainuddin¹, Abdul Halim¹, M. Anis Ilahi Rahmadhani¹, Padhlani Qurrata A'yun¹, Mujahid Ikhlusal Amal¹, Ismail¹, A. Besse Riyani Indah²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan KM. 10, Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan

² Departemen Teknik Industri, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino Km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

m.facheruddinbj@poliupg.ac.id¹

Abstrak

Kebocoran pada *riser wall tube* merupakan salah satu permasalahan utama pada boiler pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena berperan vital dalam proses pembentukan uap sehingga kegagalannya berdampak langsung pada kinerja termodinamika dan kontinuitas operasi pembangkit. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak kebocoran riser wall tube terhadap performa termodinamika dan kerugian energi pada PLTU XYZ Unit 1. Penelitian ini menganalisis kasus kebocoran *riser wall tube* dengan membandingkan kondisi operasional sebelum dan sesudah kejadian. Data menunjukkan penurunan beban dari 49,3 MW menjadi 40 MW, penurunan tekanan uap utama dari 8,6 MPa menjadi 8,13 MPa, serta penurunan temperatur uap dari 536 °C menjadi 530°C. Selain itu, tekanan *furnace* meningkat signifikan dari -214 Pa menjadi 2.500 Pa, sedangkan tekanan *windbox* naik dari 12,3 kPa menjadi 17,5 kPa. Kondisi ini diikuti penurunan efisiensi boiler dari 88% menjadi 80% dan peningkatan konsumsi bahan bakar. Hasil perhitungan menunjukkan total kerugian energi sebesar 5.968.095 kWh dengan nilai kerugian finansial mencapai Rp. 4.243.613.949, menegaskan bahwa kebocoran *riser wall tube* tidak hanya menurunkan performa teknis pembangkit, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan strategi *predictive maintenance*, inspeksi rutin dengan metode *non-destructive test* (NDT), serta monitoring *real-time* parameter operasi menjadi langkah penting untuk meningkatkan keandalan, memperpanjang umur komponen kritis, dan meminimalkan risiko kerugian akibat kebocoran serupa di masa mendatang.

Kata kunci : *riser wall tube*, kebocoran, PLTU, efisiensi energi, kerugian kWh.

Abstract

Leakage in the riser wall tube is one of the main problems in the boiler of a steam power plant (PLTU) because it plays a vital role in the steam formation process so that its failure directly impacts the thermodynamic performance and continuity of plant operation. The purpose of this study is to analyze the impact of leaking riser wall tubes on thermodynamic performance and energy losses in PLTU XYZ Unit 1. This study analyzes the case of the leaking riser wall tube by comparing operational conditions before and after the incident. The data shows a decrease in load from 49.3 MW to 40 MW, a decrease in main steam pressure from 8.6 MPa to 8.13 MPa, and a decrease in steam temperature from 536°C to 530°C. In addition, the furnace pressure increased significantly from -214 Pa to 2,500 Pa, while the windbox pressure increased from 12.3 kPa to 17.5 kPa. This condition is followed by a decrease in boiler efficiency from 88% to 80% and an increase in fuel consumption. The calculation results show a total energy loss of 5,968,095 kWh with a financial loss value of Rp 4,243,613,949, confirming that the riser wall tube leak not only reduces the technical performance of the plant but also causes significant economic losses. This study concludes that the implementation of predictive maintenance strategies, routine inspections using non-destructive testing (NDT) methods, and real-time monitoring of operating parameters are important steps to improve reliability, extend the life of critical components, and minimize the risk of losses due to similar leaks in the future.

Key words : *riser wall tube*, leak, PLTU, energy efficiency, kWh loss.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi salah satu penyedia utama energi listrik di Indonesia. Hal ini didorong oleh ketersediaan batubara yang melimpah, harga bahan bakar yang relatif lebih rendah dibanding energi primer lain, serta kemampuan PLTU menghasilkan daya dalam skala besar secara kontinu [1]. Akan tetapi, tingginya ketergantungan terhadap PLTU juga menjadikan isu keandalan dan efisiensi sebagai faktor yang sangat krusial [2]. Gangguan sekecil apa pun pada sistem boiler dapat menyebabkan penurunan produksi listrik dalam jumlah besar dan berdampak pada kestabilan pasokan energi nasional [3].

Boiler sebagai jantung PLTU bekerja berdasarkan prinsip siklus Rankine, di mana air dipanaskan hingga menjadi uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin [4]. Keandalan boiler sangat dipengaruhi oleh integritas komponen utamanya, salah satunya adalah *riser wall tube* [5]. *Riser wall tube* berfungsi menyalurkan air sirkulasi ke *furnace* untuk dipanaskan menjadi uap sehingga komponen ini selalu terpapar temperatur tinggi [6], tekanan internal tinggi, serta gas hasil pembakaran yang mengandung partikel abrasif dan zat korosif [7], [8]. Kondisi ekstrem ini membuat *riser wall tube* menjadi salah satu titik paling rentan terhadap kegagalan [9].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kebocoran pada *riser wall tube* merupakan salah satu penyebab utama terjadinya *forced outage* pada PLTU di berbagai negara [10]. Kegagalan tersebut umumnya disebabkan oleh mekanisme korosi dan erosi pada dinding pipa, yang dilaporkan menyumbang lebih dari 60% dari total kasus kerusakan pada sistem boiler [11], [12]. Setiap kejadian kebocoran pipa tidak hanya menurunkan performa teknis pembangkit, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan akibat hilangnya produksi listrik, bahkan dapat mencapai jutaan dolar untuk satu kejadian [13]. Di Indonesia, gangguan serupa pada sistem boiler juga berdampak besar terhadap kinerja pembangkit, dengan potensi kehilangan produksi hingga jutaan kWh dan kerugian finansial mencapai miliaran rupiah tergantung pada kapasitas unit [3].

Selain faktor teknis, aspek ekonomi dari kebocoran juga sangat penting untuk diperhatikan. Kerugian energi yang besar berdampak pada kerugian finansial yang signifikan, terutama bagi pembangkit berbasis skema jual beli listrik [14]. Analisis kerugian energi akibat kerusakan komponen boiler penting untuk menyusun strategi

pemeliharaan yang lebih efektif [15]. *Predictive maintenance* berbasis data, penggunaan material yang lebih tahan terhadap korosi, dan inspeksi berkala dengan metode *non-destructive test* (NDT) menjadi pendekatan yang banyak direkomendasikan [16][17].

Kasus kebocoran *riser wall tube* di PLTU XYZ Unit 1 pada 12 Juni 2024 menjadi bukti nyata betapa serius dampak kegagalan komponen ini. Perubahan signifikan terjadi pada parameter operasional, termasuk penurunan beban, penurunan tekanan dan temperatur uap, kenaikan tekanan *furnace* dan *windbox*, serta turunnya efisiensi boiler. Tidak hanya itu, kerugian energi tercatat mencapai jutaan kWh dengan dampak finansial yang sangat besar.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak kebocoran *riser wall tube* terhadap produksi energi dan kerugian kWh di PLTU XYZ Unit 1. Hasil analisis ini diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman lebih mendalam terkait kasus yang terjadi, tetapi juga dapat menjadi dasar untuk pengembangan strategi pemeliharaan yang lebih efektif dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi PLTU di masa depan [18].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan pendekatan studi kasus dengan menganalisis data operasional unit sebelum terjadinya kebocoran diperoleh dari *historical trend* (*histrend*) parameter operasi pada sistem *Distributed Control System* (DCS) boiler. Data tersebut mencakup seluruh variabel proses yang terekam dan diarsipkan secara otomatis selama periode operasi normal sebelum dan sesudah insiden kebocoran terjadi. Selain itu, informasi pendukung juga dikumpulkan dari *logsheet* harian operator untuk memverifikasi konsistensi dan validitas data hasil perekaman sistem beserta data pendukung lainnya seperti laporan Root Cause Failure Analysis (RCFA) PLTU XYZ Unit 1. Data yang dianalisis meliputi:

- Beban operasional unit (MW),
- Tekanan dan temperatur steam utama,
- Aliran feed water,
- Tekanan *furnace* dan *windbox*,
- Efisiensi boiler,
- Produksi energi dan konsumsi bahan bakar,
- Estimasi kerugian energi dan finansial.

Langkah analisis meliputi:

1. Membandingkan parameter operasional sebelum dan sesudah kebocoran.

2. Menghitung kerugian energi (kWh) berdasarkan durasi gangguan.
3. Menghitung kerugian finansial menggunakan perbedaan harga jual listrik dan biaya operasional.
4. Menganalisis penurunan efisiensi dan peningkatan konsumsi bahan bakar.
5. Menyusun rekomendasi berbasis hasil analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari laporan operasi PLTU XYZ Unit 1 sebelum dan sesudah kebocoran *riser wall tube* menunjukkan adanya perubahan signifikan pada beberapa parameter utama. Pada kondisi normal, unit mampu beroperasi dengan beban sekitar 49,3 MW dengan tekanan uap utama sebesar 8,6 MPa dan temperatur uap mencapai 536 °C. Namun, setelah kebocoran terjadi, beban turun menjadi 40 MW, tekanan uap turun menjadi 8,13 MPa, dan temperatur uap turun menjadi 530 °C. Penurunan ini menunjukkan bahwa kebocoran berdampak langsung pada kestabilan suplai uap ke turbin.

Tabel 1 Data Operasional Boiler

Parameter	Sebelum Kebocoran	Setelah Kebocoran
Beban Operasional (MW)	49,3	40
Tekanan Steam Utama (MPa)	8,6	8,13
Temperatur Steam (°C)	536	530
Aliran Feed Water (t/h)	212	209
Tekanan Furnace (Pa)	-214	2.500
Tekanan Windbox (kPa)	12,3	17,5
Efisiensi Boiler (%)	88	80
Konsumsi Bahan Bakar	100	105

Selain itu, aliran *feed water* mengalami sedikit penurunan dari 212 t/h menjadi 209 t/h, sedangkan tekanan *furnace* justru meningkat drastis dari kondisi normal -214 Pa menjadi 2.500 Pa. Hal ini menandakan adanya gangguan pada sirkulasi gas pembakaran di dalam *furnace*. Peningkatan serupa juga terjadi pada tekanan *windbox*, dari 12,3 kPa menjadi 17,5 kPa, yang menunjukkan bertambahnya resistansi aliran udara pembakaran akibat kebocoran.



Gambar 1 Kondisi kebocoran pada *riser wall tube*

Selain data operasional yang tercatat, bukti visual juga memperlihatkan kondisi nyata terjadinya kebocoran pada *riser wall tube*. Pada gambar hasil inspeksi lapangan terlihat jelas semburan fluida bertekanan keluar melalui celah kecil pada permukaan pipa. Fenomena ini menegaskan adanya penipisan dinding pipa akibat erosi dan korosi sehingga material tidak lagi mampu menahan tekanan internal.

Kebocoran ini menyebabkan unit berhenti beroperasi untuk mencegah kerusakan lebih lanjut serta menjaga keselamatan sistem. Kondisi ini juga menjelaskan mengapa tekanan *furnace* dan *windbox* mengalami kenaikan signifikan sebagaimana tercatat dalam data operasional.

Dengan adanya bukti visual ini, data numerik yang tercatat pada sistem operasi makin diperkuat bahwa kebocoran *riser wall tube* memang menjadi penyebab utama penurunan performa dan terjadinya kerugian energi maupun finansial pada PLTU XYZ Unit 1.

1. Perhitungan Kerugian Energi

Perhitungan kerugian energi dilakukan dengan mengalikan rata-rata produksi energi per jam pada kondisi normal dengan total durasi gangguan akibat kebocoran dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$E_{loss} = P_{normal} \times t_{gangguan} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

E_{loss} = energi yang hilang akibat gangguan (kWh)

P_{normal} = daya keluaran normal unit pembangkit sebelum terjadi gangguan (kW atau MW)

$t_{gangguan}$ = durasi waktu gangguan atau penurunan beban akibat kebocoran (jam)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung total energi listrik yang tidak dapat diproduksi selama periode gangguan. Nilai E_{loss} menggambarkan besarnya kehilangan produksi energi akibat berhentinya atau menurunnya kinerja unit pembangkit.

Diketahui:

$$P_{normal} = 45.270 \text{ kWh/jam}$$

$$t_{gangguan} = 131,83 \text{ jam}$$

Ditanyakan:

$$E_{loss} = ?$$

Penyelesaian:

$$E_{loss} = P_{normal} \times t_{gangguan}$$

$$E_{loss} = 45.270 \times 131,83$$

$$E_{loss} = 5.968.095 \text{ kWh}$$

Nilai kehilangan energi sebesar 5.968.095 kWh menggambarkan total energi listrik yang seharusnya dapat diproduksi oleh unit pembangkit selama periode gangguan. Untuk memberikan gambaran skala dampaknya, nilai tersebut dapat dibandingkan dengan kebutuhan listrik rumah tangga.

Tabel 2 Listrik Yang Didistribusikan Kepada Pelanggan (GWh) Tahun 2023

Kelompok Pelanggan - PLN	Tahun 2023
Sosial	11.496,09
Rumah Tangga	122.339,71
Bisnis	57.112,02
Industri	88.587,71
Publik	8.900,31
Semua Pelanggan	288.435,84

Menurut Data Badan Pusat Statistik, PLN, dan Kementerian ESDM (2023), rata-rata konsumsi listrik rumah tangga di Indonesia berada pada kisaran 1.200–1.500 kWh per rumah tangga per tahun, atau sekitar 100–125 kWh per bulan, yang ekuivalen dengan 3,3–4,2 kWh per hari. Dengan demikian, dalam satu jam, konsumsi listrik rata-rata sebuah rumah tangga sekitar:

$$\text{Konsumsi per jam} = \frac{4,0 \text{ kWh}}{24} = 0,17 \text{ kWh/jam}$$

Jika total energi yang hilang sebesar 5.968.095 kWh dibandingkan dengan konsumsi rata-rata per rumah tangga per jam tersebut, maka:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah rumah tangga ekuivalen} &= \frac{5.968.095}{0,17} \\ &= 35.100.000 \text{ rumah tangga-jam} \end{aligned}$$

Artinya, energi yang hilang akibat kebocoran setara dengan kebutuhan listrik lebih dari 200 ribu rumah tangga selama sekitar 175 jam (sekitar satu minggu operasi normal).

2. Perhitungan Kerugian Finansial

Kerugian finansial dihitung berdasarkan biaya operasional per kWh dan harga jual energi. Nilai perbedaan harga per kWh dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$L_{finansial} = (H_{jual} - C_{operasi}) \times E_{loss}$$

Keterangan:

$L_{finansial}$ = kerugian ekonomi akibat kehilangan produksi listrik (Rp)

H_{jual} = harga jual listrik ke jaringan (*feed-in tariff*) (Rp/kWh)

$C_{operasi}$ = biaya operasional rata-rata pembangkit per satuan energi (Rp/kWh)

E_{loss} = energi yang hilang akibat gangguan (kWh)

Persamaan ini menghitung besarnya kerugian finansial bersih yang ditimbulkan oleh gangguan operasi, dengan mempertimbangkan selisih antara potensi pendapatan dari penjualan listrik dan biaya operasional yang seharusnya dikeluarkan untuk menghasilkan energi tersebut.

Diketahui:

$$H_{jual} = \text{Rp } 1.445/\text{kWh}$$

$$C_{operasi} = 733,95/\text{kWh}$$

$$E_{loss} = 5.968.095 \text{ kWh}$$

Ditanyakan:

$$L_{finansial} = ?$$

Penyelesaian:

$$L_{finansial} = (H_{jual} - C_{operasi}) \times E_{loss}$$

$$L_{finansial} = (1.445 - 733,95) \times 5.968.095$$

$$L_{finansial} = 711,05 \times 5.968.095$$

$$L_{finansial} = \text{Rp } 4.243.613.949$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebocoran pada *riser wall tube* tidak hanya

menurunkan kinerja teknis pembangkit, tetapi juga memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Berdasarkan data operasi, kondisi normal unit menghasilkan daya rata-rata sebesar 45.270 kWh per jam, sedangkan selama periode gangguan terjadi kehilangan produksi energi total sebesar 5.968.095 kWh. Jika nilai tersebut dikonversi ke aspek finansial, maka diperoleh estimasi kerugian mencapai Rp 4.243.613.949 untuk satu kali kejadian. Tabel 3 menyajikan ringkasan hasil perhitungan produksi energi dan kerugian akibat kebocoran.

Tabel 3 Produksi Energi dan Kerugian

Parameter	Nilai	Satuan
Produksi Energi Normal	45.270	kWh/jam
Total Kerugian Energi	5.968.095	kWh
Kerugian Finansial	4.243.613.949	IDR

Kerugian energi sebesar hampir enam juta kWh tersebut menunjukkan besarnya dampak operasional yang ditimbulkan oleh kebocoran pada *Riser Wall Tube*. Nilai tersebut setara dengan kehilangan potensi pasokan listrik untuk lebih dari 200 ribu rumah tangga per jam operasi sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya. Fakta ini menegaskan pentingnya penerapan strategi pemeliharaan prediktif, inspeksi periodik menggunakan metode *non-destructive test* (NDT), serta penerapan sistem monitoring *real-time* guna mendeteksi indikasi anomali tekanan dan temperatur lebih dini. Upaya ini diharapkan dapat meminimalkan risiko *forced outage*, meningkatkan keandalan sistem, serta menekan potensi kerugian ekonomi di masa mendatang.

Hasil perhitungan ini memperlihatkan bahwa kebocoran riser wall tube tidak hanya menurunkan kinerja teknis pembangkit, tetapi juga berdampak signifikan pada sisi ekonomi. Kerugian miliaran rupiah dalam satu kali kejadian menegaskan pentingnya strategi pemeliharaan prediktif dan sistem monitoring yang lebih baik untuk mencegah terulangnya masalah serupa di masa depan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Ghosh et al. [5] yang melaporkan bahwa kebocoran pada *water wall tube* umumnya disebabkan oleh kombinasi korosi dan erosi pada sisi *furnace*, yang menyebabkan penurunan efisiensi termal boiler hingga 10%. Kondisi serupa juga ditemukan oleh Xue et al. [9], di mana kebocoran pada *water-wall tubes* menyebabkan peningkatan tekanan *furnace* dan tidak seimbangan sirkulasi gas pembakaran, pola yang identik dengan hasil pengamatan di PLTU XYZ Unit 1.

Selain itu, studi oleh Sethi dan Vikash [10] menunjukkan bahwa kegagalan dinding pipa pada boiler tipe *Benson once-through* menyebabkan penurunan tekanan uap utama sebesar 5–8% dan peningkatan konsumsi bahan bakar yang signifikan, hasil yang konsisten dengan penurunan efisiensi dari 88% menjadi 80% pada penelitian ini. Temuan Nurbanasari et al. [13] juga memperkuat bahwa kebocoran pipa boiler tidak hanya berdampak pada kinerja teknis, tetapi menimbulkan kerugian ekonomi besar akibat *forced outage* yang memerlukan waktu perbaikan panjang.

Dengan demikian, hasil studi kasus PLTU XYZ Unit 1 memperkuat kajian sebelumnya bahwa kebocoran pipa riser merupakan salah satu penyebab utama penurunan efisiensi sistem dan peningkatan biaya operasi pada PLTU, serta menegaskan pentingnya implementasi *predictive maintenance* dan inspeksi NDT secara berkala untuk menjaga keandalan pembangkit.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kebocoran *riser wall tube* pada PLTU XYZ Unit 1 memberikan dampak multidimensional yang sangat serius, baik terhadap aspek teknis, efisiensi energi, maupun ekonomi operasional pembangkit.

Secara operasional, kebocoran ini menyebabkan penurunan beban unit secara drastis dari 49,3 MW menjadi 40 MW, disertai turunnya tekanan dan temperatur uap utama. Perubahan ini menandakan terganggunya kestabilan sirkulasi fluida kerja dan penurunan kemampuan sistem dalam mentransfer energi panas secara optimal ke turbin sehingga menurunkan reliabilitas sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Dampak lanjutan terdeteksi pada parameter *furnace* dan *windbox*, di mana tekanan mengalami peningkatan signifikan dibandingkan kondisi normal. Fenomena tersebut mengindikasikan ketidakseimbangan aliran udara dan gas pembakaran, yang berakibat pada pembakaran tidak sempurna dan menurunnya efisiensi termal boiler dari 88% menjadi 80%. Akibatnya, konsumsi bahan bakar meningkat, menandakan terjadinya penurunan efektivitas proses konversi energi dari panas menjadi listrik.

Dari sisi produksi energi, tercatat kerugian energi sebesar 5.968.095 kWh selama periode gangguan, dengan estimasi kerugian finansial mencapai Rp 4.243.613.949. Nilai ini menunjukkan bahwa kebocoran *riser wall tube* tidak hanya menjadi masalah teknis internal, tetapi juga

menimbulkan kerugian ekonomi makro bagi sistem kelistrikan yang bergantung pada unit tersebut.

Dengan demikian, integritas *riser wall tube* terbukti menjadi komponen krusial dalam menjaga stabilitas termohidrolik, efisiensi sistem, dan keberlanjutan operasi pembangkit. Upaya pencegahan melalui pemeliharaan prediktif berbasis data, inspeksi nondestruktif berkala, serta sistem monitoring *real-time* wajib diterapkan secara konsisten untuk meminimalkan potensi kegagalan serupa dan menjaga kinerja optimal PLTU di masa mendatang.

REKOMENDASI

1. Monitoring *real-time* parameter operasi

Disarankan agar PLTU XYZ Unit 1 menerapkan sistem monitoring *real-time* pada parameter kritis seperti tekanan *furnace*, tekanan *windbox*, aliran *feed water*, serta temperatur dan tekanan uap utama. Dengan adanya sensor dan sistem pengawasan yang terintegrasi, anomali kecil dapat terdeteksi lebih dini sehingga potensi kebocoran atau gangguan serius bisa dicegah sebelum berdampak pada kinerja pembangkit.

2. Inspeksi rutin dengan *Non-Destructive Test* (NDT)

Pemeriksaan berkala dengan metode NDT, seperti *ultrasonic thickness test* atau *radiographic test*, penting untuk mengevaluasi kondisi material *riser wall tube* tanpa harus menghentikan operasi dalam waktu lama. Dengan metode ini, penipisan pipa akibat erosi atau korosi dapat diketahui lebih cepat sehingga tindakan perbaikan atau penggantian bisa dilakukan sebelum kebocoran terjadi.

3. Penggantian material dengan ketahanan lebih baik terhadap erosi/korosi

Riser wall tube yang bekerja pada kondisi temperatur tinggi dan terpapar aliran gas pembakaran sering mengalami kerusakan akibat abrasi maupun korosi. Oleh karena itu, penggunaan material dengan ketahanan lebih tinggi, misalnya baja paduan khusus yang tahan panas dan abrasi, perlu dipertimbangkan. Langkah ini akan memperpanjang umur pakai pipa dan mengurangi risiko kebocoran berulang.

4. Penerapan *predictive maintenance* berbasis data

Selain pemeliharaan rutin, *predictive maintenance* berbasis analisis data operasi sangat diperlukan. Dengan memanfaatkan data historis dan algoritma analitik, operator dapat memprediksi tren

kerusakan pada komponen boiler. Hal ini memungkinkan tindakan pemeliharaan dilakukan lebih tepat waktu sehingga risiko *downtime* akibat kebocoran dapat ditekan seminimal mungkin.

5. Penyusunan rencana kontinjensi untuk mengurangi *downtime*

Kebocoran *riser wall tube* berpotensi menghentikan operasi unit secara tiba-tiba. Oleh karena itu, penting untuk menyusun rencana kontinjensi, seperti prosedur pelepasan beban secara bertahap, kesiapan peralatan cadangan hingga strategi perbaikan darurat. Dengan adanya rencana ini, waktu henti operasi dapat diminimalkan dan dampak kerugian finansial dapat ditekan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Sethi and O. Vikash, "Failure analysis of the water-wall tube in once through Benson boiler," *Mater Today Proc*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.143>.
- [2] C. Bhattacharya, B. Saha, J. Manna, and S. Bera, *Impact of Boiler Tube Failure in Power Pricing & Profitability*. 2007.
- [3] C. deni Mulyadi, T. Kristyadi, A. Putra, and D. Rusirawan, "Analisa Prestasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Berbahan Bakar BatuBara Hasil Upgrading," *Infotekmesin*, vol. 12, pp. 81–87, Mar. 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.370.
- [4] D. Ghosh, H. Roy, A. Saha, and C. Subramanian, "Failure Analysis of Boiler Water Wall Tube: A Case Study from Thermal Power Plant," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 22, Jan. 2022, doi: 10.1007/s11668-021-01271-y.
- [5] D. S and J. A. V. V, "Analysis of corrosive degradation and failure of water wall tubes," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 2168–2172, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.359>.
- [6] G. Prokhorskii, S. Rudra, M. Preissinger, and E. Eder, "A data-driven regression model for predicting thermal plant performance under load fluctuations," *Carbon Neutrality*, vol. 3, Oct. 2024, doi: 10.1007/s43979-024-00108-5.

- [7] J. H. Bulloch, A. G. Callagy, S. Scully, and A. Greene, "A failure analysis and remnant life assessment of boiler evaporator tubes in two 250MW boilers," *Eng Fail Anal*, vol. 16, no. 3, pp. 775–793, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.06.020>.
- [8] L. Pang, S. Yi, L. Duan, W. Li, and Y. Yang, "Thermal Stress and Cyclic Stress Analysis of a Vertical Water-Cooled Wall at a Utility Boiler under Flexible Operation," *Energies (Basel)*, vol. 12, p. 1170, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12061170.
- [9] M. Dharmakusuma, B. Belyamin, and W. Widiyatmoko, "Analisis Eksergi Pada Boiler PLTU," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 1, pp. 45–53, Oct. 2020, doi: 10.32722/jmt.v1i1.3331.
- [10] M. Gabonewe, M. Munsamy, and A. Telukdarie, *Evaluating the effectiveness of a boiler plant's predictive maintenance system*. 2021. doi: 10.1109/TEMSCON-EUR52034.2021.9488631.
- [11] M. Nurbanasari *et al.*, "Metallurgical analysis of a water wall tube leakage in a 600-MW coal-fired power plant," *Eng Fail Anal*, vol. 182, p. 110004, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110004>.
- [12] P. S. Sanjay and D. R. K. Mandloi, "A Failure Analysis and Remaining Life assessment of Boiler Water Wall tube," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 7, 2016.
- [13] P. Tadge, S. Kumar, S. Kumar De, and S. Kumar Mohanty, "Metallurgical investigation of boiler tube failure in a power plant," *Mater Today Proc*, vol. 66, pp. 3799–3803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.164>.
- [14] R. K. Hosseini and Sh. Yareiee, "Failure analysis of boiler tube at a petrochemical plant," *Eng Fail Anal*, vol. 106, p. 104146, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104146>.
- [15] S. Noori and J. Price, "A risk approach to the management of boiler tube thinning," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp. 405–414, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.09.019.
- [16] S. Xue *et al.*, "Analysis of the causes of leakages and preventive strategies of boiler water-wall tubes in a thermal power plant," *Eng Fail Anal*, vol. 110, p. 104381, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104381>.
- [17] X. Sun, Y. Ning, J. Yang, Y. Zhao, Z. Yang, and X. Zhou, "Study on high temperature corrosion mechanism of water wall tubes of 350 MW supercritical unit," *Eng Fail Anal*, vol. 121, p. 105131, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105131>.
- [18] Z. Yan, L. Wang, X. Li, J. Wei, C. Liu, and Y. Da, "Failure mechanism of superheater tubes of waste heat boiler for waste incineration in complex environment," *Eng Fail Anal*, vol. 139, p. 106457, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106457>.

FILTER SYSTEM DESIGNED TO REDUCE THE EMISSION OF GASOLINE MOTORCYCLE POLLUTANTS

Yusvardi Yusuf¹, Muhammad Bayu Wardana¹, Ni Ketut Caturwati¹, Erny Listijorini¹, Dhimas Satria¹, Dwinanto Sukanto¹, Mekro Permana Pinem¹

¹Department of Mechanical Engineering, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jendral Sudirman km 3, Cilegon 42435, Indonesia

mekro_pinem@untirta.ac.id¹

Abstract

Clean, healthy air is a major topic worldwide. It is because poor air quality hurts human health and is even responsible for the deaths of millions of people. This work develops exhaust pipes with filters to reduce pollutants emitted by motorcycles. Three pollutant concentrations are measured here: CO₂, CO, and HC. The measurements were taken before and after the filter system to calculate pollutant reduction. The maximum pollutant reduction of the filter system: 6.1 % of CO₂, 8.0 % of CO, and 651.0 ppm of HC. The main mechanism of this filter is the physical trapping of pollutants. When the gas flows through the exhaust pipe, pollutants in the stream are captured by the filter through direct contact. This could be observed visually by the change in the filter color, which darkens after use in the exhaust pipe. However, the limitation of this work is the short-term experiment, lasting only 5 minutes, which is a key for the next research. It is also necessary to have alternative filters that are sustainable and can work properly in high-temperature conditions.

Key words : filter, pollutant, air quality, physical trapping, high temperature.

INTRODUCTION

Air pollution is one of the biggest crises, deteriorating human well-being worldwide. As reported by the *World Health Organization* (WHO), millions of people died, directly or indirectly, due to poor air quality. [1]. It is the second primary factor of death risk in the world [2]. A study by J. Rentschler and N. Leonova even found a disproportionate impact between low and high-income countries [3], and unfortunately, the low-income population suffers more from poor air quality. Frequently, their job requires outdoor activities that directly expose them to poor air quality. Therefore, poor air quality is a complex issue that needs to be considered by future urban planners and policymakers [4]. Those facts show that air pollution needs to be solved as soon as possible.

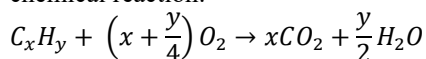
There are many sources of air pollution. It can happen naturally (wildfires, dust storms, and volcanic eruptions) or in human activities (combustion, agriculture, and waste production). One of the largest sources of human activity-related air pollution is the transportation sector. Many attempts have already been made to minimize air pollution, either by advancing the technology to

have more efficient transportation systems or enacting policies to support mass transportation modes [5]. Another attempt to reduce emissions could be made by developing technology that produces pollutants, such as the open burning of fields of rice straw [6]. Those efforts are necessary to prevent harmful consequences in the future [7]. In other words, a comprehensive approach is needed to tackle air pollution from the transportation sector.

A WHO global air quality guidelines report shows that the transportation sector remains the dominant source of air pollution. For many cities in developing countries, traffic congestion and poor vehicle regulations even make the air quality worse [8]. A common approach for reducing pollutants from the street is tree planting. Unfortunately, the impact of street trees on air quality depends heavily on specific conditions. For some conditions, even that approach does not help the situation at all [9]. Therefore, it is necessary to develop technology that directly reduces pollutants from the transportation sector.

In the Southeast Asia region, the transportation sector is dominated by motorcycles (almost 80%) [10]. This mode of transportation offers affordable mobility and is much more flexible than other modes. That makes motorcycles the favorite mode of transportation for urban cities in developed countries and contributes to a greater amount of air pollution [11]. The problem is not

complete combustion happens, CO₂ is the primary product with water (H₂O) as described in the chemical reaction:



The engine's high efficiency could be indicated by a higher CO₂ concentration relative to other carbon species in the exhaust pipe. As mentioned before, it is impossible to achieve a perfect combustion reaction in the engine's combustion chamber. A lack of oxygen prevents carbon atoms from oxidizing fully, leading to the formation of CO rather than CO₂. The CO molecules are more dangerous when exposed directly to humans compared to CO₂ [17]. On the other hand, when the fuel molecules burn partially, HC is formed, indicating wasted fuel. These pollutants contribute to greenhouse gases and lead to poor air quality [18].

The velocity of the pollutant exiting the exhaust pipe decreased as more filter mass was added. This becomes one of the constraints when designing a filter system. Back pressure should be avoided as much as possible to maintain low exhaust emissions [19]. The figure below displays the pollutant concentration to show the effectiveness of the filter system.

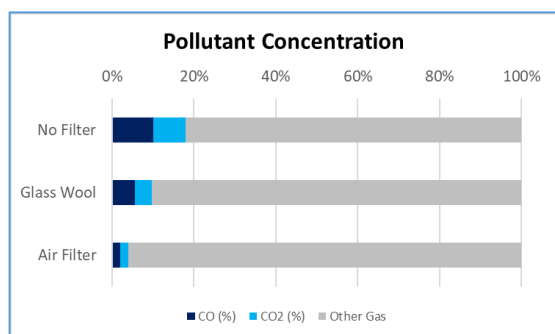


Figure 2. The reduction of pollutants CO and CO₂

The graph shows three schemes: no filter, glass wool filter, and air filter. This filter system can reduce the concentration of pollutants emitted from the exhaust pipe. Glas wool reduces CO and CO₂ concentrations by 4.4% and 3.9%, respectively.

On the other hand, the air filter system reduces CO concentrations by 8.0% and CO₂ concentrations by 6.1%. In this case, the air filter system performs better in reducing the CO and CO₂ than glass wool. Another pollutant measured in this work is hydrocarbons (HC). The figure below shows HC concentration in ppm.

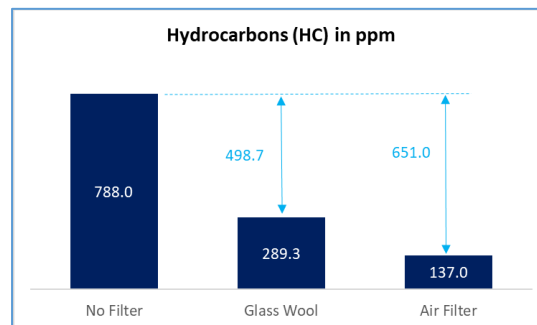


Figure 3. The reduction of HC pollutants

When filtering HC, glass wool reduces 498.7 ppm, and the air filter reduces 651.0 ppm. Here, the air filter system also works better than the glass wool.

The air filter and glass wool indeed reduced the pollutants CO, CO₂, and HC after the engine had been running for five minutes. When incomplete combustion occurs in the engine, fine particles are expelled into the exhaust pipe. Those particles are known as soot, a solid, black, and amorphous form of carbon. It can be observed that the filter color darkens after use. The color change is due to soot accumulation on the filter. These fine particles are trapped in the filter system which then reduces the concentration of pollutants emitted from the exhaust pipe.

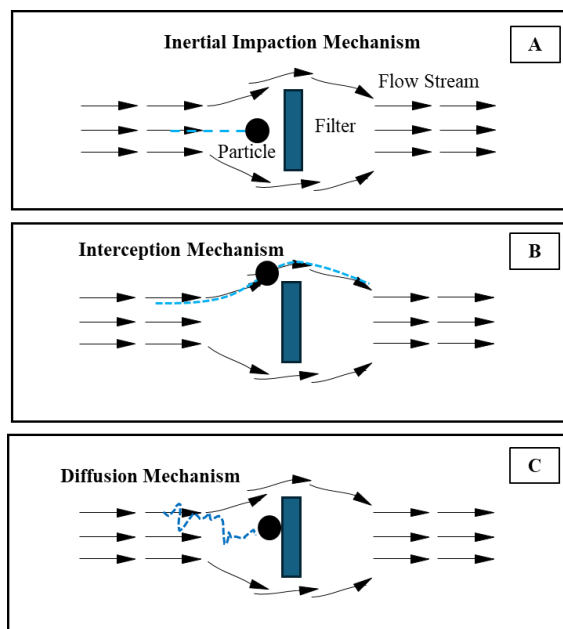


Figure 4. Filtration Mechanism: 4A) Inertial Impaction; 4B) Interception; 4C) Diffusion.

The mechanism for reducing pollutants in this filter system is mainly due to physical trapping as the gas flows and to contact with the filter [20]. During interaction between the gas stream and the

filter, some of the gas particles are attached to the filter via inertial or interception mechanisms. When the filter system is working correctly, especially when the exhaust pipe temperature is still low, heavier hydrocarbons are absorbed by the filter. However, as the temperature increases, some of those pollutants may desorb and return to the gas stream. Since there is no charge involved in this experiment, the diffusion mechanism did not happen.

CONCLUSION

This filter system can reduce pollutants such as CO₂, CO, and HC. The air filter performs better in reducing pollutants. However, upon inspection after use, both materials are damaged and should be disposed of. The color changes significantly darker and cannot be used anymore. Therefore, future research needs to change the filter material. Furthermore, sustainable and eco-friendly materials should be prioritized so that when the filter is used and needs to be disposed of, it will not cause environmental issues.

Another limitation of this work is that the experiment only works for five to ten minutes, which needs to be extended to be more applicable in the real world. It is necessary to conduct experiments over a more extended period to assess the durability of the filter system.

REFERENCES

- [1] "Nearly 50 million people sign up for clean air action for better health." Accessed: Mar. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/news/item/17-03-2025-nearly-50-million-people-sign-up-call-for-clean-air-action-for-better-health>.
- [2] "State of Global Air Report 2024 | State of Global Air." Accessed: May 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>.
- [3] A. Hassani and V. Hosseini, "An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution," *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 47, pp. 1–12, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.003.
- [4] A. M. Siregar, C. A. Siregar, and M. Yani, "Engineering of motorcycle exhaust gases to reduce air pollution," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 821, no. 1, p. 012048, Apr. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/821/1/012048.
- [5] C. Harjono, L. Gianto, R. Sidik, and D. Widaningrum, "FORECASTING AIR POLLUTION DRIVEN BY VEHICLE GROWTH, PUBLIC TRANSPORT, INDUSTRY, AND HOUSEHOLD WASTE," *J. Environ. Sci. Sustain. Dev.*, vol. 7, no. 2, pp. 743–763, Dec. 2024, doi: 10.7454/jessd.v7i2.1272.
- [6] H. S. Yap *et al.*, "The importance of air quality for underground spaces: An international survey of public attitudes," *Indoor Air*, vol. 31, no. 6, pp. 2239–2251, 2021, doi: 10.1111/ina.12863.
- [7] I. Kang and S. Yang, "The Effect of Back Pressure Change on Exhaust Emissions According to the Confluence Geometry of a Dual Exhaust System in Idling," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12041855.
- [8] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review," *Front. Public Health*, vol. 8, Feb. 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [9] J. Chatkin, L. Correa, and U. Santos, "External Environmental Pollution as a Risk Factor for Asthma," *Clin. Rev. Allergy Immunol.*, vol. 62, no. 1, pp. 72–89, Feb. 2022, doi: 10.1007/s12016-020-08830-5.
- [10] J. Rentschler and N. Leonova, "Global air pollution exposure and poverty," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 4432, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-39797-4.
- [11] L. Feng *et al.*, "Study on the Optimized Muffler with Function of PM Filtration for Non-Road Diesel Engines," *Atmosphere*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/atmos13020350.
- [12] L. M. Henning *et al.*, "Review on Polymeric, Inorganic, and Composite Materials for Air Filters: From Processing to Properties," *Adv. Energy Sustain. Res.*, vol. 2, no. 5, p. 2100005, 2021, doi: 10.1002/aesr.202100005.
- [13] M. P. Pinem *et al.*, "Perspective through Monte Carlo simulations for open field burning

- emission in Indonesia and alternative way of using rice straw as particle board production,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 3073, no. 1, p. 050002, Mar. 2024, doi: 10.1063/5.0193647.
- [14] M. Yadegari and M. Ghassemi, “Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber,” *Iran. J. Mech. Eng. Trans. ISME*, vol. 23, no. 1, pp. 122–146, Mar. 2022, doi: 10.30506/jmee.2022.547922.1282.
- [15] M.-Y. Jin, L.-Y. Zhang, Z.-R. Peng, H.-D. He, P. Kumar, and J. Gallagher, “The impact of dynamic traffic and wind conditions on green infrastructure performance to improve local air quality,” *Sci. Total Environ.*, vol. 917, p. 170211, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170211.
- [16] O. A. Odunlami, O. K. Oderinde, F. A. Akeredolu, J. A. Sonibare, O. R. Obanla, and M. E. Ojewumi, “The effect of air-fuel ratio on tailpipe exhaust emission of motorcycles,” *Fuel Commun.*, vol. 11, p. 100040, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jfuco.2021.100040.
- [17] S. Liu, H. Li, W. Kun, Z. Zhang, and H. Wu, “How Do Transportation Influencing Factors Affect Air Pollutants from Vehicles in China? Evidence from Threshold Effect,” *Sustainability*, vol. 14, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14159402.
- [18] T. M. Chukwu, S. Morse, and R. Murphy, “Poor Air Quality in Urban Settings: A Comparison of Perceptual Indicators, Causes and Management in Two Cities,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031438.
- [19] Y.-L. T. Nguyen, Le ,Anh-Tuan, Duc ,Khanh Nguyen, Duy ,Vinh Nguyen, and C. D. and Nguyen, “A study on emission and fuel consumption of motorcycles in idle mode and the impacts on air quality in Hanoi, Vietnam,” *Int. J. Urban Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 522–541, Oct. 2021, doi: 10.1080/12265934.2020.1871059.
- [20] Z. Hussain, B. Marcel, A. Majeed, and R. S. M. Tsimisaraka, “Effects of transport–carbon intensity, transportation, and economic complexity on environmental and health expenditures,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 26, no. 7, pp. 16523–16553, Jul. 2024, doi: 10.1007/s10668-023-03297-8.

Petunjuk Umum

Panjang maksimal sebuah jurnal ilmiah adalah 6 - 8 halaman dengan penulisan spasi tunggal, *justify*, huruf Times New Roman ukuran 10 point *regular* dan format penulisan kolom *double*. Artikel ilmiah menggunakan kertas ukuran A4 (210 x 297 mm) dengan penulisan batas tepi kiri, atas, kanan, dan bawah, secara berurutan masing-masing adalah 3 cm, 2.5 cm, 2.5 cm, dan 2.5 cm. Batas kepala dan kaki area tulisan (*header* dan *footer*) adalah 1.5 cm dan 1.3 cm. Permulaan alinea ditulis menjorok ke dalam 1 cm. Semua istilah asing dicetak miring (*italic form*).

Petunjuk Penulisan

Petunjuk penulisan antara lain sebagai berikut:

1. Judul Jurnal Ilmiah

Memberi gambaran penelitian yang telah dilakukan. Berisi maksimal 15 kata. Times New Roman 11, spasi 1, spacing after 6 pt dan ditebalkan (*Bold*) (Style Judul)

2. Nama penulis

- Nama penulis tanpa menggunakan gelar, ditulis di bawah judul. Jarak antara judul dan nama penulis diberi satu spasi kosong, dengan ukuran huruf Times New Roman 11 pt, Bold (Style Penulis)
- Nama program studi dan fakultas (nama lembaga) ditulis di bawah nama penulis. Jarak antara nama penulis dan lembaga diberi satu spasi kosong, dengan ukuran huruf Times New Roman 11 pt, spacing after 6 pt (Style Keterangan Penulis).
- Email penulis pertama ditulis di bawah nama lembaga. Email ditulis dengan ukuran huruf Times New Roman 10 pt dan dicetak miring (*italics*). Jarak antara nama lembaga dan email spacing after 6 pt., dengan ukuran huruf Times New Roman 11 pt (Style Keterangan Penulis)..

3. Abstrak

Abstrak hanya satu paragraf maksimum 250 kata, memuat uraian singkat mengenai masalah dan tujuan penelitian, metode yang digunakan, dan hasil penelitian. Tekanan penulisan abstrak terutama pada hasil penelitian. Abstrak ditulis dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris. Kata kunci perlu dicantumkan untuk menggambarkan ranah masalah yang diteliti dan istilah-istilah pokok yang mendasari pelaksanaan penelitian. Kata-kata kunci dapat berupa kata tunggal atau gabungan kata. Jumlah kata kunci 3-5 kata. Kata kunci ini diperlukan untuk komputerisasi. Pencarian judul penelitian dan abstraknya dipermudah dengan kata-kata kunci tersebut. Pengetikan abstrak dilakukan dengan spasi tunggal, huruf Times New Roman 10, spacing before 12 pt, after 2 pt (Style Abstrak).

4. Pendahuluan

Pendahuluan memuat latar belakang penelitian secara ringkas dan padat, dan tujuan. Dukungan teori tidak perlu dimasukkan pada bagian ini, tetapi penelitian sejenis yang dilakukan dapat dinyatakan. Pengetikan menggunakan huruf Times New Roman 10, spasi 1, spacing before 12 pt, after 2 pt.

5. Metode penelitian

Pada dasarnya bagian ini menjelaskan bagaimana penelitian itu dilakukan. Materi pokok bagian ini adalah : (1) rancangan penelitian; (2) populasi dan sampel (sasaran penelitian); (3) teknik pengumpulan data dan pengembangan instrumen; (4) dan teknik analisis data. Untuk penelitian menggunakan alat dan bahan, perlu dituliskan spesifikasi alat dan bahannya. Spesifikasi alat menggambarkan kecanggihan alat yang digunakan sedangkan spesifikasi bahan menggambarkan bahan yang digunakan.

Untuk penelitian kualitatif seperti penelitian tindakan kelas, etnografi, fenomenologi, studi kasus dan lain-lain, perlu ditambahkan kehadiran peneliti, subjek penelitian, informan yang ikut membantu beserta cara-cara menggali data-data penelitian, lokasi dan lama penelitian serta uraian mengenai pengecekan keabsahan hasil penelitian.

6. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini memuat data (dalam bentuk ringkas), analisis data dan interpretasi terhadap hasil. Pembahasan dilakukan dengan mengaitkan studi empiris atau teori interpretasi. Jika dilihat dari proporsi tulisan, bagian ini harusnya mengambil proporsi terbanyak bisa mencapai 50% atau lebih.

7. Penutup

Bagian ini memuat kesimpulan dan saran. Kesimpulan dan saran dapat dibuat dalam sub bagian terpisah. Kesimpulan menjawab tujuan, bukan mengulang teori, berarti menyatakan hasil penelitian secara ringkas. Saran merupakan penelitian lanjutan yang dirasa masih diperlukan untuk penyempurnaan hasil penelitian supaya berdaya guna. Penelitian tentunya tidak selalu berdaya guna bagi masyarakat dalam satu kali penelitian, tapi merupakan rangkaian penelitian yang berkelanjutan.

8. Daftar Pustaka

Bagian ini hanya memuat referensi yang benar-benar dirujuk. Dengan demikian, referensi yang dimasukkan pada bagian ini akan ditemukan tertulis pada bagian-bagian sebelumnya. Sistematika penulisannya adalah mengikuti format Mendeley dengan menggunakan style IEEE dengan menggunakan style daftar pustaka.

9. Penulisan persamaan

Penulisan persamaan dalam *font* Times New Roman atau *font* Symbol menggunakan ukuran 11 point dengan menuliskan Nomor Persamaan yang diletakkan di dalam kurung pada akhir margin kanan yaitu (1), (2) dan seterusnya. Nomor persamaan harus berurutan. Penulisan persamaan diberi jarak satu spasi pada sebelum dan sesudah penulisannya.

10. Penyajian Gambar dan Tabel

Nama Tabel ditulis di atas tabel pada sisi kiri dan bernomor urut dengan huruf tebal (*bold*). Antara Nama Tabel dan tabel tidak ada spasi. Tabel dibuat rata tengah, hanya terdiri dari tiga garis horisontal dengan ketentuan satu garis di atas tulisan kepala tabel dan satu garis yang mengapitnya, serta satu garis lagi berada pada bagian paling bawah dari isi tabel. Antara tabel dengan teks dibawahnya diberi jarak satu spasi, demikian juga sebelumnya.

Gambar dibuat rata tengah dengan Nomor Urut dan Nama Gambar diletakkan di bawah gambar. Jarak gambar dengan Nama Gambar adalah satu spasi, demikian juga dengan jarak antara Nama gambar dengan teks dibawahnya. Penulisan Nama Gambar dengan huruf tebal dan rata tengah. Jika Tabel atau Gambar diambil dari sumber lain atau bukan hasil penelitian penulis, harus dicantumkan sumber kutipannya.

Template Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Universitas Bangka Belitung

JUDUL (Style Judul)

<Style normal : font 10 point, Line Spacing Single>

Nama penulis¹, nama penulis² (Style Penulis)

¹ Program Studi, Fakultas, Universitas (Style Keterangan)

Alamat Universitas

² Program Studi, Fakultas, Universitas

Alamat Universitas

Email penulis¹

<Style normal>

Abstrak (Style Abstrak: 10 pt, Bold)

<Style normal>

Abstrak ditulis dalam Bahasa Indonesia, terdiri dari satu paragraf, memuat tujuan, metode penelitian yang digunakan dan hasil (Style Isi Abstrak :10 pt, Line Spacing Single)

<Style normal>

Kata kunci : maksimum lima kata kunci. aaaa, bbbb, cccc, dddd, eeee. (Style Isi Abstrak :10 pt, Line Spacing Single)

<Style normal>

Abstract (10 pt, Bold) (Style Abstrak: 10 pt, Bold, Italic)

<Style normal>

Abstrak ditulis dalam Bahasa Inggris, satu paragraf, memuat tujuan, metode penelitian yang digunakan dan hasil. (Style Isi Abstrak :10 pt, Italic, Line Spacing Single)

<Style normal>

Key words : maksimum lima kata kunci. aaaa, bbbb, cccc, dddd, eeee. (Style Isi Abstrak :10 pt, Line Spacing Single)

<Style normal>

PENDAHULUAN (Semua judul bab menggunakan (Style Judul Bab))

Pendahuluan memuat latar belakang penelitian secara ringkas dan padat, dan tujuan. Dukungan teori tidak perlu dimasukkan pada bagian ini, tetapi penelitian sejenis yang sudah dilakukan dapat dinyatakan. (Isi jurnal menggunakan (Style Isi Jurnal))

METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan prosedur dan teknik penelitian. Antara satu penelitian dengan penelitian yang lain, prosedur dan tekniknya akan berbeda. Kalau tidak berbeda, berarti penelitian itu hanya mengulang penelitian yang sudah ada sebelumnya. Tapi bukan berarti harus berbeda semuanya. Untuk penelitian sosial misalnya, populasi penelitian mungkin saja sama, tapi teknik samplingnya berbeda, teknik pengumpulan datanya berbeda, analisis datanya berbeda, dan lain-lain. Mohon diuraikan dengan jelas, bukan hanya mengopi dari penelitian lain. Kalau mau disertakan penelitian yang dilakukan termasuk ke dalam

kategori penelitian yang mana, mohon diperhatikan dengan baik, jangan asal mengopi. Bagian ini bisa dibagi menjadi beberapa sub bab, dengan mencantumkan penomorannya menggunakan style sub bab.

1. Perumusan masalah (Style Sub Bab)
(Style isi jurnal) Penjelasan menggunakan style isi jurnal.
2. Metode penelitian (Style Sub Bab)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memuat data (dalam bentuk ringkas), analisis data dan interpretasi terhadap hasil. Pembahasan dilakukan dengan mengkaitkan studi empiris atau teori untuk interpretasi. Jika dilihat dari proporsi tulisan, bagian ini harusnya mengambil proporsi terbanyak, bisa mencapai 50% atau lebih. Bagian ini bisa dibagi menjadi beberapa sub bab, tetapi tidak perlu mencantumkan penomorannya.

Jika menggunakan tabel, maka penulisannya seperti pada tabel 1.

Tabel 1 Nama Tabel (Style Captiom)

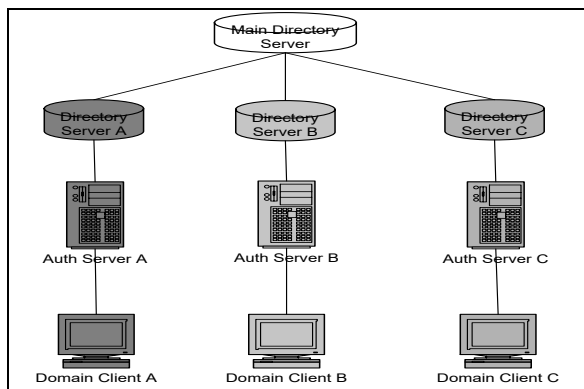
| Kolom 1 | Kolom 2 | Kolom 3 | Kolom 4 |
|---------|---------|---------|---------|
| | | | |

Sumber : xxxxxxxx

<Style normal>

Jika menggunakan gambar, maka penggambarannya dibuat sebagai berikut:

<Style normal>



(Style Posisi Gambar)

Gambar 1 Nama Gambar (Style Caption)

Rumus menggunakan (style Rumus) dengan bentuk sebagai berikut:

Y=ax+bx (1)

1. Sitasi dan Daftar Referensi (style sub bab)

(Style isi jurnal) Penunjukan sitasi dengan menggunakan style IEEE. Tanda baca kalimat mengikuti tanda kurung [2]. Berbagai referensi [2], [3] masing-masing diberi nomor dengan kurung terpisah [1] - [3]. Saat mengutip bagian dalam buku, tolong berikan nomor halaman yang relevan. Dalam kalimat, merujuk hanya ke nomor referensi, seperti pada [3]. Jangan gunakan "Ref. [3]" atau "referensi [3]" kecuali pada awal kalimat: "Hossain [3] menunjukkan ..."

2. Catatan Kaki (style sub bab)

(Style isi jurnal) Cobalah untuk menghindari catatan kaki. Berikan semua nama penulis; jangan gunakan "et al." Gunakan spasi setelah inisial penulis. Makalah telah dikirimkan untuk publikasi atau yang belum diterima atau dipublikasikan tidak perlu dikutip. Makalah yang telah diterima untuk publikasi, tetapi belum ditentukan untuk masalah ini harus terdaftar sebagai "Dalam pers" [5]. Referensi adalah lekukan gantung 5mm.

KESIMPULAN

Berisikan kesimpulan hasil dari pembahasan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diperkenankan bagi penulis dengan memberikan ucapan terima kasih kepada lembaga yang membiayai penelitian tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Moghal A. A. B., Dafalla M. A., Elkady T. Y., and Al-Shamrani M.A., Lime Leachability Studies on Stabilized Expansive Semi-Arid Soil. International Journal of GEOMATE, Vol. 9, Issue 18, 2015, pp.1467-1471.

[2] Awal A.S.M.A, Hosseini H. and Hossain M.Z., Strength, Modulus of Elasticity and Shrinkage Behaviour of Concrete Containing Waste Carpet Fiber, International Journal of GEOMATE, Vol. 9, Issue 17, 2015, pp. 1441-1446.

[3] Hossain M.Z., For Chapter in a Book, Soil Mechics, 4th ed. Vol. 2, Sakai, Ed. Sankeisha Publisher's Name, Year, pp. 11-60.

[4] Author H., A Book New York Publisher, Year, pp.1-200.

[5] Annnn B., Unpublished Work but Accepted, Vol., Issue, Year.

[6] Kimura S., Journal Paper Title, J. of Computer Science, Vol. 1, Issue 2, 1987, pp. 23-49.

[7] Islam M.R., Conference proceedings, in Proc. 2nd Int. Conf. on GEOMATE, 2011, pp. 8-13.

[8] Hossain M.Z. and Awal A.S.M.A., Experimental Validation of a Theoretical Model for Flexural Modulus of Elasticity of Thin Cement Composite, Const. Build. Mat., Vol.25, No.3, 2011, pp.1460-1465.



MACHINE Jurnal Teknik Mesin

Alamat Redaksi :

Gedung Jurusan Teknik Mesin- Fakultas Sains dan Teknik
Universitas Bangka Belitung
Kampus Terpadu Universitas Bangka Belitung
Balunijuk, Kab. Bangka, Prov. Kep. Bangka Belitung
Laman : <https://journal.ubb.ac.id/index.php/machine>
e-Mail : mesinubb@yahoo.com

