

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

MACHINE

JURNAL TEKNIK MESIN

Vol. 12 No. 1 April 2026

Jurnal
Teknik Mesin

Vol. 12

No. 1

Hal

April 2026

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



Program Studi Teknik Mesin
Jurusan Teknologi Industri dan Rekayasa Pertambangan
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. Rodiawan, S.T., M.Eng. Prac., Ph.D
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.
Rustam Efendi, S.T., M.Si., IPP
Aris Sandi, S.ST., M.Eng.
Deri Teguh Santoso, S.T., M.T.
Dr. Ilham Ary Wahyudie, M.T., CIIQA

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

Ir. Suhdi, S.ST., M.T., Ph.D. (UBB)
Scopus ID: 57226594044; Sinta ID: 5984872

Dr. Dwinanto, S.T., M.T. (Untirta)
Sinta ID: 260303

Dr. Dinni Agustina, S.T., M.T. (Unri)
Sinta ID: 6667853

Azhar Syafiq Putra, S.T., M.Eng. (ITK)
Sinta ID: 6958669

Ahmad Mamba'udin, S.Tr.T., M.Eng. (Polines)
Sinta ID: 6941036

Aulia Majid, S.T., M.Eng. (UNY)
Sinta ID: 6861410

Sekretariat:

Nia Erawati, S.I.Pust.

Laman Jurnal:

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

Alamat Redaksi:

Gedung Babel IV

Program Studi Teknik Mesin - Jurusan Teknologi Industri dan
Rekayasa Pertambangan – Fakultas Sains dan Teknik, Kampus
Terpadu Universitas Bangka Belitung Balunijuk, 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 KONVERSI SISTEM KARBURATOR MENJADI SISTEM INJEKSI TERHADAP PERFORMA DAN KONSUMSI BAHAN BAKAR SEPEDA MOTOR 130CC	174
Agus Dwiyanto ¹ , Hasanudin ^{1*} , Eka Yawara ¹ , Eufrasia Andranetta Gracelyne Eka Pramudita ²	174
ANALISIS PERFORMANCE TEST ENGINE CT7-9C PADA PESAWAT CN235 DI TEST CELL PT. NUSANTARA TURBIN DAN PROPULSI	180
Mathias Nobel ¹ , Victoriano Jonathan Lendeng ¹	180
IMPLEMENTASI <i>INTERNET OF THINGS</i> PADA ALAT PRAKTIKUM VISKOMETER UNTUK PEMBELAJARAN FISIKA	186
Isma Dwi Puspitasari ¹ , Adian Aristia Anas ¹ , Dwi Arnoldi ¹	186
EVALUASI KINERJA DAN EFISIENSI POMPA SENTRIFUGAL PADA SISTEM PENGOLAHAN MINYAK MENTAH : STUDI KASUS PT. X	193
Surya Ramadhan Bhakti Saputra ¹ , Mochamad Febrian Adhi Patria ²	193
RANCANG BANGUN DAN ANALISIS REGULATOR KONVENSIONAL DENGAN REGULATOR IC PADA TOYOTA KIJANG TIPE KF 40	202
Arifa Rizal Raspati ¹	202
ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR ARM CHAIR PRODUKSI INDUSTRI FURNITUR MENGGUNAKAN METODE FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)	207
Wahyu Widiyanto ¹ , Agung Ari Purwanto ¹ , Soleh Muhamad ¹ , Nurmadina ¹ , Dhian Juwita ¹	207
ANALISIS KEANDALAN MESIN JET DYEING MENGGUNAKAN METODE RCM DAN FMEA PADA INDUSTRI TEKSTIL	216
Rangga Putra Irdian ¹ , Jojo Sumarjo ¹ , Deri Teguh Santoso ¹ , Marno ¹ , Kayla Rahma Nourizka ²	216
IDENTIFIKASI RISIKO BAHAYA KERJA DENGAN METODE HIRADC DI PT. PELABUHAN TANJUNG PRIOK PADA BAGIAN <i>MAINTENANCE</i> MESIN <i>GANTRY LIFTING CRANE</i> (GLC)	223
Ariyo Agustianto Wibowo ¹ , Sulaeman Deni Ramdani ¹ , Misar Hardiyani ¹	223
EVALUATION STUDY ON PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER – 4000 IN CENTRAL PROCESSING AREA PT. PERTAMINA EP ASSET 4 SUKOWATI FIELD	232
Izal Daffa Rizqullah ¹ , Dimas Ilham Akbar ¹ , Amma Muzayyin ¹ , Wiliandi Saputro ² , Ardika Nurawati ¹ , Erwan Adi Saputro ^{1*}	232
PERANCANGAN DAN ANALISIS <i>LOADER</i> INPUT MESIN TEMPERING PADA <i>LINE PRODUKSI HOT COIL SPRING</i> PT. XYZ	238
Aditya Nugraha ¹ , Agustinus Wisnu Setiawan ¹ , Yudha Samudra ¹	238

PENGARUH KONVERSI SISTEM KARBURATOR MENJADI SISTEM INJEKSI TERHADAP PERFORMA DAN KONSUMSI BAHAN BAKAR SEPEDA MOTOR 130cc

Agus Dwiyanto ¹, Hasanudin ^{1*}, Eka Yawara ¹, Eufrasia Andranetta Gracelynne Eka Pramudita ²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Jl. Babarsari, Catur Tunggal Depok, Sleman Yogyakarta

² Program Studi Teknik Industri, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gajah Mada

Jl. Grafika No. 2, Mlati, Sleman, Yogyakarta

Agusdwiyanto@itny.ac.id ¹

Abstrak

Peningkatan performa mesin dan efisiensi penggunaan bahan bakar merupakan aspek penting dalam pengembangan teknologi otomotif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konversi sistem bahan bakar dari karburator menjadi sistem injeksi terhadap performa mesin dan konsumsi bahan bakar pada sepeda motor bebek berkapasitas 130 cc. Pengujian dilakukan dengan dua metode, yaitu uji performa mesin menggunakan *chassis dynamometer* dan uji konsumsi bahan bakar dengan mengukur volume bahan bakar yang digunakan selama satu menit. Pengujian konsumsi bahan bakar dilakukan pada berbagai kecepatan putaran mesin, yaitu 2000, 3000, 4000, 5000, dan 6000 RPM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konversi sistem bahan bakar dari karburator ke injeksi meningkatkan performa mesin dan efisiensi bahan bakar. Daya maksimum pada sistem karburator tercatat sebesar 12,2 HP pada 9500 RPM, sedangkan pada sistem injeksi meningkat menjadi 12,8 HP pada 9500 RPM. Selain itu, sistem injeksi menunjukkan konsumsi bahan bakar yang lebih hemat pada setiap kecepatan putaran mesin, dengan perbedaan sebesar 5 mL per menit pada putaran mesin 5000 RPM dibandingkan dengan sistem karburator. Dengan demikian, sistem bahan bakar injeksi terbukti memberikan peningkatan performa dan efisiensi yang signifikan dibandingkan sistem karburator.

Kata kunci : maksimum konversi sistem bahan bakar, injeksi, karburator, performa, efisiensi bahan bakar.

Abstract

Improving engine performance and fuel efficiency are important aspects in automotive technology development. This study aims to analyze the effect of converting the fuel system from a carburetor to an injection system on engine performance and fuel consumption in 130 cc mopeds. The testing was conducted using two methods, namely engine performance testing using a chassis dynamometer and fuel consumption testing by measuring the volume of fuel used in one minute. Fuel consumption testing was conducted at various engine speeds, namely 2000, 3000, 4000, 5000, and 6000 RPM. The test results showed that converting the fuel system from carburetor to injection improved engine performance and fuel efficiency. The maximum power in the carburetor system was recorded at 12.2 HP at 9500 RPM, while in the injection system it increased to 12.8 HP at 9500 RPM. In addition, the injection system showed more economical fuel consumption at every engine speed, with a difference of 5 mL per minute at 5000 RPM compared to the carburetor system. Thus, the injection fuel system was proven to provide a significant improvement in performance and efficiency compared to the carburetor system.

Key words : fuel system conversion, injection, carburetor, performance, fuel efficiency.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dalam bidang otomotif terus mengalami kemajuan yang pesat,

khususnya dalam beberapa hal seperti peningkatan efisiensi konsumsi bahan bakar, peningkatan performa mesin, serta pengurangan emisi gas buang. Komponen yang utama dalam sistem kerja kendaraan bermotor salah satunya yaitu sistem bahan bakar yang berperan penting dalam efisiensi

dan performa. Sepeda motor sebagai moda transportasi yang umum digunakan oleh masyarakat Indonesia masih banyak yang mengandalkan sistem bahan bakar konvensional, yaitu karburator.

Sistem karburator bekerja secara mekanis dalam mencampurkan udara dan bahan bakar sebelum proses pembakaran. Walaupun sistem ini tergolong sederhana, murah, dan mudah dalam perawatan, karburator memiliki sejumlah kelemahan. Di antaranya adalah keterbatasan dalam penyesuaian perbandingan campuran antara bahan bakar dengan udara yang sesuai untuk kebutuhan mesin pada berbagai kondisi, sehingga menyebabkan tidak sempurnanya proses pembakaran, meningkatnya konsumsi bahan bakar, dan emisi gas buang yang melampaui ketetapan pemerintah tentang ambang batas emisi yang diizinkan [1].

Produsen kendaraan bermotor mulai mengembangkan dan menerapkan sistem bahan bakar injeksi elektronik atau *Electronic Fuel Injection* (EFI) untuk mengatasi kekurangan sistem karburator. EFI menggunakan berbagai sensor seperti sensor suhu mesin, sensor tekanan udara, sensor posisi *throttle*, dan sensor oksigen. Data dari sensor-sensor tersebut kemudian diolah oleh *Electronic Control Unit* (ECU). Data output dari ECU digunakan sebagai input bagi injector untuk penyemprotan bahan bakar yang lebih presisi dan sesuai dengan kondisi mesin, sehingga proses pembakaran menjadi lebih efisien dan bersih [2].

Penerapan EFI pada sepeda motor memberikan berbagai keuntungan dibandingkan karburator, antara lain: Efisiensi bahan bakar meningkat. Mesin menjadi lebih responsif dan mudah dihidupkan dalam segala kondisi. Interval perawatan yang lebih panjang karena sistemnya dikontrol secara elektronik.

Namun, kenyataannya masih banyak sepeda motor yang menggunakan karburator dan belum beralih ke sistem EFI. Hal ini menjadi tantangan sekaligus peluang untuk melakukan konversi sistem bahan bakar dari karburator ke EFI. Sepeda motor konvensional dengan konversi ini, dapat ditingkatkan performanya tanpa harus mengganti kendaraan secara keseluruhan. Selain itu, konversi ini sejalan dengan program pemerintah dalam pengurangan emisi gas buang dan upaya menuju kendaraan yang lebih ramah lingkungan [3].

Oleh karena itu, kajian mengenai proses konversi sistem bahan bakar dari karburator ke EFI sangat relevan untuk dilakukan. Kajian ini tidak hanya akan meninjau dari sisi teknis dan ekonomis, tetapi juga dari sisi lingkungan dan regulasi. Masyarakat diharapkan dapat memahami proses konversi ini secara menyeluruh dan menerapkannya.

Beberapa penelitian berkaitan dengan studi konversi sistem bahan bakar karburator menjadi EFI di Indonesia diantaranya: Pengujian pengaruh performa pada motor sport 200 cc. Performa sistem injeksi didapatkan daya maksimum 30.1 HP. Pada performa sistem karburator didapatkan daya maksimum 28.8 HP [4]. Melakukan konversi sistem karburator ke sistem injeksi pada sepeda motor Honda legenda. Hasil menunjukkan peningkatan daya maksimum yang sebelumnya 7,4 HP meningkat menjadi 9,4 HP saat dilakukan uji performa [5]. Konversi dari sistem karburator menjadi injeksi pada sepeda motor Suzuki smash, kemudian dilakukan pengujian konsumsi bahan bakar. Dari hasilnya menunjukkan adanya penurunan konsumsi bahan bakar rata-rata mencapai 22,6 %. Hasil uji performa juga menunjukkan peningkatan baik daya maksimum dari 8,1 HP meningkat menjadi 9,0 HP [6]. Konversi sistem suplai bahan bakar karburator menjadi sistem injeksi bahan bakar elektronik (EFI) untuk meningkatkan efisiensi dan performa mesin, khususnya pada kendaraan vintage [7]. Membandingkan konsumsi bahan bakar antara sepeda motor bermesin 4 tak dengan kapasitas 110 cc dengan menggunakan sistem bahan bakar karburator dan sistem injeksi [8]. Perbandingan daya, torsi mesin, dan efisiensi bahan bakar antara sistem karburator dan sistem injeksi pada sepeda motor sport 250 cc [9].

Berdasarkan uraian diatas, Peneliti akan melakukan studi tentang pengaruh konversi sistem karburator menjadi sistem injeksi terhadap performa dan konsumsi bahan bakar dengan objek penelitian sepeda motor bebek dengan kapasitas silinder 130 cc.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Beberapa bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian yaitu: sepeda motor dengan mesin silinder tunggal yang sudah ditingkatkan berkapasitasnya menjadi 130 cc dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Mesin 4 tak, 2 Katup SOHC, dengan sistem pendingin udara
2. Diameter × Langkah: 56 mm × 54 mm.
3. Perbandingan Kompresi: 10.5 : 1
4. Sistem Pelumasan: Pelumasan Basah
5. Tipe Kopling : Basah, *Multiplate*.
6. Tipe Transmisi: 4 kecepatan.
7. Bahan bakar menggunakan jenis pertamax turbo (RON 98).

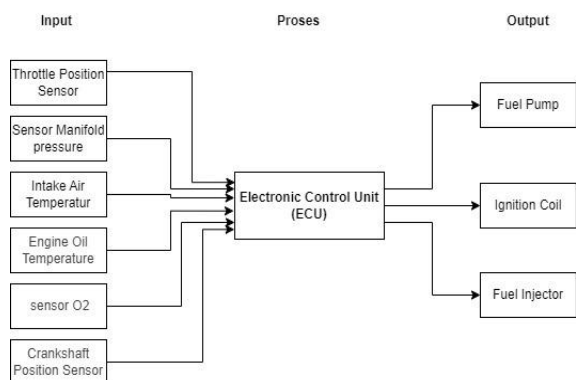
Alat yang digunakan

Beberapa alat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Chasis dynamometer* yang sudah terkalibrasi standar ISO 1585
2. *Digital tachometer*
3. *Stopwacth*
4. Gelas ukur bahan bakar
5. *Blower*

Skema Sistem *Electronic Fuel Injection* yang digunakan

Sistem *fuel injection* yang digunakan yaitu tipe close loop dengan beberapa sensor yang terhubung ke ECU dengan output utama sudut pengapaaian dan jumlah semprotan bahan bakar yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema Sistem EFI

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan variabel yang diamati performa mesin dan konsumsi bahan bakar sebelum dan sesudah dilakukan konversi sistem karburator menjadi sistem injeksi pada sepeda motor bebek 130 cc.

Pengujian Performa Mesin

Pengujian performa mesin dilakukan untuk memperoleh data daya dan torsi pada setiap kelipatan 500 rpm dari putaran mesin 3500-10.000 rpm, pada sistem bahan bakar karburator dan sistem bahan bakar injeksi dengan ECU (*Electronic Control Unit*) Standar. Pengujian performa mesin dilakukan sebanyak sepuluh kali pada setiap sistem bahan bakar. Instrumen penelitian terdiri dari alat uji dan alat ukur yang digunakan untuk mendapatkan data performa mesin, yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Pengujian Daya dan Torsi menggunakan *chasis dynamometer*

Pengujian Konsumsi Bahan Bakar

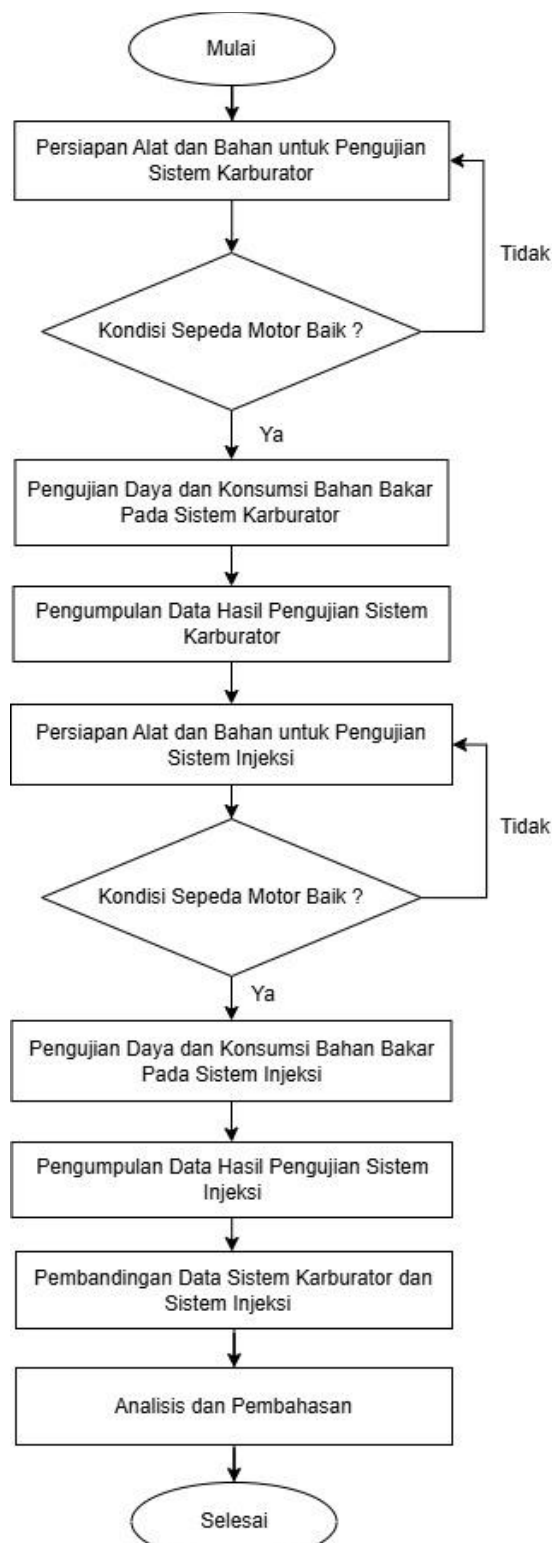
Pada pengujian ini, dilakukan saat kendaraan berhenti tanpa beban, dengan putaran mesin yang sudah ditentukan antara lain: 2000, 3000, 4000, 5000, dan 6000, alat bantu yang digunakan berupa digital *tachometer*. Alat ini akan dapat digunakan untuk menampilkan putaran mesin yang sedang menyala. Data konsumsi bahan bakar dilakukan analisis pada setiap RPM dalam waktu 1 menit, dan setiap RPM dilakukan sebanyak 3 kali percobaan. Pengujian konsumsi bahan bakar dilakukan di Laboratorium Performa Mesin ITNY. Instrumen terdiri dari gelas ukur yang digunakan untuk mendapatkan data konsumsi bahan bakar, ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Pengujian Konsumsi Bahan Bakar

Diagram Alir Penelitian

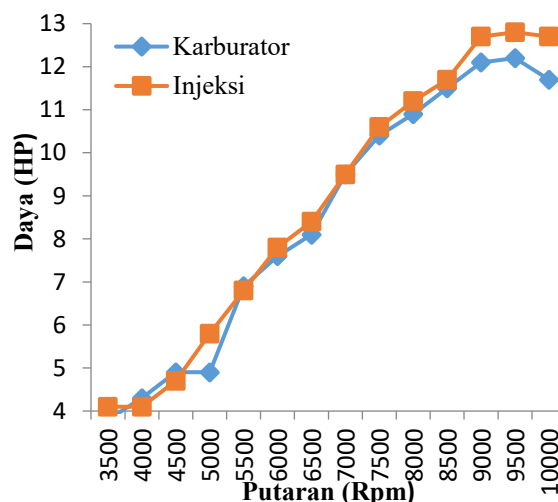
Beberapa tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada diagram alir, lihat Gambar 4.



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

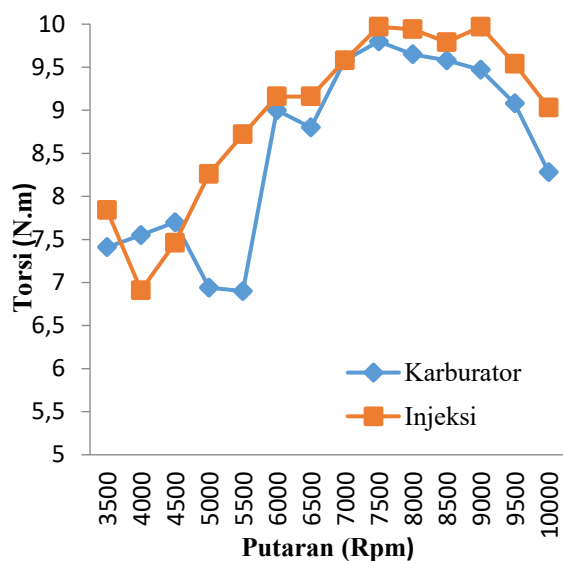
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan Data yang diperoleh dari hasil eksperimen meliputi daya, torsi, dan putaran dari mesin sepeda motor yang memiliki kapasitas 130 cc yang diuji dengan menggunakan *dynotest* tipe chasis. Pengujian dilakukan dengan menggunakan dua jenis sistem bahan bakar, yaitu karburator dan injeksi. Hasil pengukuran daya untuk masing-masing sistem bahan bakar ditunjukkan dalam Gambar 5, sedangkan hasil pengukuran torsi diperlihatkan dalam Gambar 6.



Gambar 5 Grafik daya terhadap putaran mesin

Berdasarkan data dari Gambar 5, dapat dilihat perbandingan output daya dari sistem bahan bakar karburator dengan sistem injeksi yang menggunakan bahan bakar Pertamina Turbo (RON 98). Hasil dari grafik merupakan nilai rata-rata dari sepuluh kali pengujian *dynotest*. Hasil pengujian daya tertinggi pada saat menggunakan karburator sebesar 12.2 HP pada 9500 RPM. Perubahan sistem bahan bakar dari karburator ke injeksi sangat berpengaruh terhadap daya sepeda motor, perbedaan daya sudah terlihat dari putaran 5000 RPM sampai 10.000 RPM. Untuk daya tertinggi pada sistem injeksi sebesar 12.8 HP pada 9500 RPM. Hasil pengujian ini menunjukkan adanya peningkatan daya yang dapat dicapai ketika sepeda motor dikonversi dari karburator ke injeksi [4,5] Sedangkan pada putaran mesin dibawah 5000 RPM daya yang di hasilkan lebih rendah dari sistem bahan bakar karburator, karena untuk memenuhi efisiensi bahan bakar.

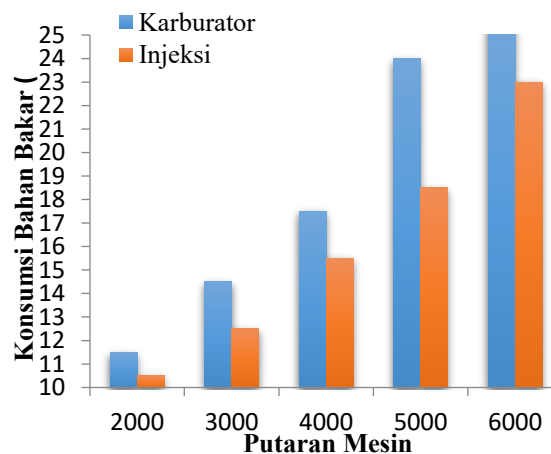


Gambar 6 Grafik torsi terhadap putaran mesin

Berdasarkan data dari Gambar 6, dapat dilihat perbandingan output dari sistem bahan bakar karburator dengan sistem injeksi yang menggunakan bahan bakar Pertamina Turbo (RON 98). Hasil dari grafik merupakan nilai rata-rata dari sepuluh kali pengujian *dynotest*. Hasil pengujian torsi tertinggi pada saat menggunakan karburator sebesar 9.8 N.m pada 7500 RPM. Perubahan sistem bahan bakar dari karburator ke injeksi sangat berpengaruh terhadap torsi sepeda motor, perbedaan daya terlihat dari putaran 5000 RPM sampai 10.000 RPM. Untuk torsi tertinggi pada sistem injeksi sebesar 9.97 N.m pada 7500 RPM. Pada sistem injeksi terjadi penurunan torsi pada putaran 4000 RPM karena penyemprotan bahan bakar jumlahnya tidak sesuai dengan kebutuhan mesin sedangkan pada sistem karburator terjadi penurunan torsi pada putaran 5000, 5500, dan 6500 RPM hal ini disebabkan oleh sistem karburator yang tidak bisa menyesuaikan campuran udara dan bahan bakar secara tepat.

Hasil Pengujian Konsumsi Bahan Bakar

Pengujian konsumsi bahan bakar pada sistem karburator dan sistem injeksi hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Grafik perbandingan konsumsi bahan bakar karburator dengan injeksi

Dari grafik hasil pengujian konsumsi bahan bakar diatas dapat dilihat, untuk sistem karburator setiap 1 menit pada putaran mesin 2000, 3000, 4000, 5000, dan 6000 RPM konsumsi bahan bakar lebih banyak dibandingkan dengan sistem injeksi. Selisih paling besar untuk konsumsi bahan bakar pada putaran 5000 RPM yaitu 5.5 ml. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem injeksi lebih efisien dalam konsumsi bahan bakar [6]. Penyebab konsumsi bahan bakar sistem karburator lebih banyak dibandingkan sistem injeksi, karena pada sistem karburator banyaknya campuran bahan bakar diatur secara mekanis dan mengandalkan kevakuman ruang bakar. Sedangkan untuk sistem injeksi semprotan bahan bakar diatur secara elektronik melalui ECU dengan input dari beberapa sensor, sehingga bahan bakar yang disemprotkan sesuai dengan kebutuhan mesin. Sistem injeksi mampu mengatur jumlah dan waktu penyemprotan bahan bakar secara lebih presisi berdasarkan kondisi operasi mesin, seperti beban, putaran, dan suhu. Hal ini menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, peningkatan tenaga mesin. Sebaliknya, sistem karburator bekerja secara mekanis dan kurang responsif terhadap perubahan kondisi mesin, sehingga cenderung menghasilkan campuran antara udara dan bahan bakar yang tidak optimal. Akibatnya, konsumsi bahan bakar menjadi lebih boros dan performa mesin tidak sebaik sistem injeksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan Konversi sistem bahan bakar karburator ke sistem bahan bakar injeksi dapat dilakukan dengan baik pada sepeda motor bebek 130 cc. Berdasarkan hasil uji performa dan uji konsumsi bahan bakar yang telah dilakukan, perubahan sistem

bahan bakar dari karburator ke injeksi ini menunjukkan adanya peningkatan performa mesin dan efisiensi konsumsi bahan bakar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada LPPMI ITNY yang membiayai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. K. A. Surya, "Modifikasi sistem bahan bakar karburator menjadi sistem bahan bakar injeksi pada Honda Legenda (tinjauan sistem pengapian)," 2016. [Online]. Available: <https://eprints.uny.ac.id/33521/1/Proyek%20Akhir%20%20Busana%20Kusuma%20Adhi%20Surya%20%2012509134056.pdf>.
- [2] I. N. Suparta et al., "Perbandingan konsumsi bahan bakar pada sistem injeksi dan sistem karburator," *Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology*, vol. 2, p. 108–113, 2021.
- [3] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, "Pedoman Konversi Sepeda Motor Bahan Bakar Konvensional ke EFI," Kementerian Perhubungan Republik, 2020. [Online]. Available: <https://hubdat.dephub.go.id>.
- [4] M. F. A. Hadi, A. Abidin, and M. H. Bahri, "Pengaruh konversi injeksi pada motor sport 200 cc terhadap performa dan efisiensi bahan bakar," *National Multidisciplinary Sciences*, vol. 3, pp. 301-310, 2020. <https://proceeding.unmuhjember.ac.id/index.php/nms/article/view/549/518>.
- [5] M. N. Hifni, N. A. Mufarida, and Kosjoko, "Uji efisiensi bahan bakar dan performa mesin pada motor sport 250 CC: Perbandingan sistem karburator dan injeksi," *Jurnal Penelitian Inovatif*, vol. 5, p. 1827–1836, 2025.
- [6] M.R., D. P. Singh et al., "Conversion of carbureted fuel supply into electronic fuel injection system," *Elementary Education Online*, vol. 20, p. 3214–3214, 2022. <https://ilkogretim-online.org/index.php/pub/article/view/2645>.
- [7] Sugiarto, Modifikasi sistem bahan bakar karburator menjadi sistem bahan bakar injeksi pada Suzuki Smash AD 2663 ZG (tinjauan sistem bahan bakar), Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2015.
- [8] Sutanto, A, Dasar-Dasar Mesin Otomotif, Jakarta: Andi, 2018.
- [9] Wirawan, D, Teknologi EFI dan Aplikasinya pada Sepeda Motor, Surabaya: Graha Ilmu, 2020.

ANALISIS PERFORMANCE TEST ENGINE CT7-9C PADA PESAWAT CN235 DI TEST CELL PT. NUSANTARA TURBIN DAN PROPULSI

Mathias Nobel¹, Victoriano Jonathan Lendeng¹

¹ Program Studi, Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI
IPSC Sentul, Bogor, 16810, Indonesia
kimakim683@gmail.com¹

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis hasil *performance test* pada *engine turboprop* CT7-9C yang digunakan pada pesawat CN235 di fasilitas *test cell* PT. Nusantara Turbin dan Propulsi. Pengujian dilakukan pasca perawatan dan *overhaul* untuk memastikan semua parameter kinerja, seperti *speed*, temperatur, putaran, *shaft horse power* (SHP), *fuel flow*, dan *pressure* memenuhi standar manufaktur. Selain itu, efisiensi *gearbox* dievaluasi dengan membandingkan torsi *input-output* di berbagai kondisi beban. Seluruh data diuji dan dikoreksi terhadap kondisi atmosfer standar. Hasil pengujian menunjukkan nilai SHP terkoreksi telah memenuhi batas minimal OEM dan temperatur berada dalam limit operasional, menandakan *engine* memenuhi kriteria *acceptance*. Efisiensi *gearbox* juga terbukti optimal, dengan nilai di atas 95% pada *power setting* utama, sementara nilai terendah terjadi pada *idle* akibat *losses* mekanik yang lebih dominan. Studi ini juga mengidentifikasi peran desain *gear*, pelumasan, distribusi beban, dan temperatur pelumas dalam memengaruhi performa dan efisiensi *engine*. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pengujian performa dan efisiensi *gearbox* sebagai langkah krusial untuk memastikan keandalan dan keselamatan sistem propulsi pesawat, serta mendukung kelangsungan operasional CN235 secara optimal dan aman.

Kata kunci : engine CT7-9C, performance test, shaft horse power (SHP), gearbox efficiency, turboprop.

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance test results of the CT7-9C turboprop engine used in the CN235 aircraft at the PT. Nusantara Turbin dan Propulsi test cell facility. The testing was conducted after maintenance and overhaul to ensure that all performance parameters, such as speed, temperature, rotation, shaft horsepower (SHP), fuel flow, and pressure, met manufacturing standards. In addition, gearbox efficiency was evaluated by comparing input-output torque under various load conditions. All data was tested and corrected to standard atmospheric conditions. The test results showed that the corrected SHP value met the OEM minimum limit and the temperature was within the operational limit, indicating that the engine met the acceptance criteria. The gearbox efficiency was also proven to be optimal, with a value above 95% at the main power setting, while the lowest value occurred at idle due to more dominant mechanical losses. This study also identified the role of gear design, lubrication, load distribution, and lubricant temperature in affecting engine performance and efficiency. Overall, this research emphasizes the importance of gearbox performance and efficiency testing as a crucial step in ensuring the reliability and safety of aircraft propulsion systems, as well as supporting the optimal and safe operational continuity of the CN235.

Key words : engine CT7-9C, performance test, shaft horse power (SHP), gearbox efficiency, turboprop.

INTRODUCTION PENDAHULUAN

Sejak lama pesawat terbang dipandang sebagai moda transportasi yang efektif karena mampu bergerak cepat, memiliki tingkat keselamatan yang tinggi, serta dapat mengangkat muatan dalam jumlah besar. Keunggulan tersebut

membuat pesawat menjadi pilihan utama, baik untuk kebutuhan sipil maupun militer. Namun demikian, intensitas operasional yang tinggi berdampak pada peningkatan jam terbang dan *flight cycle*, sehingga kebutuhan akan program perawatan dan perbaikan secara berkala tidak dapat dihindari[1]. Upaya tersebut dilakukan untuk menjaga performa, keselamatan, dan keandalan pesawat sepanjang masa

operasinya. Data menunjukkan bahwa inspeksi darat hanya mampu mengidentifikasi sekitar 60% potensi kegagalan, sementara 40% sisanya baru terdeteksi ketika pesawat sedang mengudara[2]. Kondisi ini mempertegas pentingnya penerapan sistem pemeliharaan yang menyeluruh dengan jadwal yang tepat, agar kemungkinan terjadinya kegagalan *engine* dapat ditekan. Seperti yang dijelaskan oleh Kinnison dan Howlan, biaya kerugian akibat kegagalan *engine* saat operasi jauh lebih besar dibandingkan dengan pemeliharaan terjadwal, sehingga manajemen pemeliharaan yang baik menjadi mutlak diperlukan[2]. Dalam kerangka inilah, perusahaan *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO) berperan penting. Di Indonesia, PT. Nusantara Turbin dan Propulsi (NTP) merupakan salah satu perusahaan MRO yang berfokus pada perawatan, *overhaul*, serta pengujian *engine* pesawat, termasuk tipe *turboprop*.

Salah satu *engine turboprop* yang banyak digunakan adalah *General Electric CT7-9C*, yang menjadi tenaga penggerak utama pesawat CN235[3]. Pesawat ini memiliki peran strategis dalam penerbangan sipil maupun militer, antara lain untuk misi transportasi, patroli maritim, hingga *airlift*. Oleh karena itu, performa CT7-9C harus selalu dipantau agar tetap sesuai dengan batasan operasional yang ditetapkan pabrikan. Dalam kenyataannya, performa *engine* dipengaruhi tidak hanya oleh kondisi internal, tetapi juga faktor eksternal seperti atmosfer dan fenomena aerodinamika berupa distorsi aliran pada *inlet*[4]. Distorsi aliran ini dapat menurunkan performa, meningkatkan konsumsi bahan bakar, bahkan pada kondisi ekstrem menyebabkan *surge* atau kegagalan pembakaran[4]. Dengan demikian, salah satu bentuk pengujian penting adalah *performance test*, yaitu uji untuk menilai kelayakan *engine* berdasarkan parameter utama seperti *Speed engine*, *Temperature*, *Putaran*, *Shaft Horse Power (SHP)*, *Fuel flow*, dan *Pressure*. Hasil pengujian ini akan menentukan apakah *engine* dapat dikategorikan layak (*acceptance*) untuk dioperasikan kembali.

Berdasarkan uraian tersebut, Penelitian ini mengkaji efisiensi *gearbox* (EFG) *engine CT7-9C* dengan membandingkan nilai SHP pada output poros pada keadaan *engine GRND_IDL* hingga *AUTO_PR* dengan efisiensi torsi yang terukur dalam pengujian. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi perubahan efisiensi *gearbox* dan menilai kelayakan *engine* berdasarkan parameter performa terkoreksi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi peningkatan keandalan sistem propulsi CN235 sekaligus mendukung penerapan standar perawatan dan pengujian *engine turboprop* di lingkungan MRO.

Engine Performance

Engine turbin gas harus berfungsi dengan efisien di berbagai kondisi, mulai dari permukaan laut hingga ketinggian ekstrem, dari keadaan diam hingga kecepatan tinggi, serta mampu menghadapi perubahan atmosfer, termasuk variasi temperatur[5]. Berikut adalah parameter *performance test engine CT7-9C*.

1. Speed

Pengukuran kecepatan (*speed*) pada *engine* pesawat dilakukan dengan sensor tachometer berbasis magnetik atau optik yang mendeteksi putaran poros utama *engine*. Sensor ini menghasilkan sinyal elektrik yang diproses menjadi data kecepatan putaran (sering dalam rpm untuk *shaft*, atau dalam knot lewat *pitot-static system* untuk kecepatan pesawat). Untuk *engine CT7-9C*, sensor tachometer magnetik di poros utama biasanya digunakan untuk memperoleh data *speed* yang kemudian dikirim ke *Engine Data Concentrator Unit* (EDCU) dan ditampilkan pada sistem avionik.

2. Temperatur

Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan *thermocouple* atau *Resistance Temperature Detectors* (RTD) yang dipasang pada titik-titik kritis *engine* seperti *inlet*, *compressor exit*, *turbine outlet*, dan *exhaust*. *Thermocouple* yang paling sering digunakan adalah tipe K atau E karena tahan terhadap suhu tinggi. Sinyal tegangan atau resistansi dari sensor dikalibrasi menjadi data temperatur aktual, baik untuk *monitoring* maupun kontrol performa *engine*.

3. Putaran

Putaran (RPM, *revolutions per minute*) diukur secara spesifik menggunakan tachometer elektronik yang sensornya terpasang pada *shaft* utama *engine*. Sensor ini memanfaatkan efek elektromagnetik atau optik untuk menghitung jumlah putaran *shaft* tiap menit, yang sangat penting untuk menentukan performa *engine* dan validasi *output* tenaga yang dihasilkan

4. Shaft Horse Power

Shaft Horse Power (SHP) adalah daya yang ditransfer dari *shaft engine* ke perangkat yang digerakkan (seperti baling-baling). SHP tidak diukur langsung, tapi dihitung dari hasil pengukuran *torque* dan rpm *shaft* menggunakan sensor torsi (*torque sensor*) di bagian *output shaft* dan tachometer untuk mengukur putaran.

Rumus perhitungan SHP:

1. SHP Dyno

$$\frac{\text{Dyno Speed [Rpm]} \times \text{Dyno Torque [LbFt]}}{5252} \dots\dots\dots(1)$$

2. SHP Engine

$$\frac{\text{Power Turbine [Rpm]} \times \text{Engine Torque [LbFt]}}{5252} \dots\dots(2)$$

Sensor yang digunakan untuk mengukur torsi biasanya berupa *strain gauge* atau *piezoelectric* sensor yang mengukur defleksi akibat beban torsi pada *shaft*.

5. Fuel Flow

Pengukuran *fuel flow* atau laju aliran bahan bakar menggunakan sensor *flow meter* berbasis turbin, korolis, atau *differential pressure* di *fuel line engine*. Sensor turbin menggunakan baling-baling kecil yang berputar sebanding dengan laju aliran bahan bakar; sinyal baling-baling dikonversi menjadi data volume *fuel flow*. Korolis *flow meter* mengukur massa langsung dengan efek korolis pada tabung bergetar, sementara sensor tekanan diferensial mengukur perubahan tekanan untuk mengestimasi laju alir bahan bakar .

6. Pressure

Sensor tekanan *engine* biasanya berupa *pressure transducer* (*piezoelectric*, *strain gauge*, atau *capacitance type*), yang mengukur tekanan pada berbagai titik: *inlet*, *compressor*, *turbine*, *oil*, dan *exhaust system*. Data dari sensor diubah menjadi sinyal elektrik dan dikalibrasi menjadi unit tekanan (psi, kPa, atau bar). Monitoring secara kontinu digunakan untuk analisa performa dan deteksi dini masalah pada *engine*.

Engine CT7-9C



Gambar 1 Engine Ct7-9C[6]

Penempatan sensor-sensor pengukuran performa seperti sensor torsi (untuk SHP), *tachometer* (untuk rpm/putaran), *thermocouple* (untuk temperatur), *pressure transducer* (untuk tekanan), serta *fuel flow sensor*, biasanya berada pada titik-titik strategis sepanjang *engine*, termasuk pada *shaft* utama, *inlet* dan *outlet* kompresor,

exhaust, dan jalur suplai bahan bakar. Dengan memahami letak dan fungsi tiap komponen *engine* serta sensor yang dipasang, kita bisa menilai bagaimana parameter performa diukur secara akurat dan terintegrasi dalam sistem *monitoring engine* pesawat modern seperti CT7-9C. Gambar berikut menampilkan *engine* pesawat CT7-9C yang digunakan sebagai contoh pada pembahasan sistem pengujian performa *engine*.

Spesifikasi utama *engine* ini ditampilkan dalam tabel berikut. Kombinasi desain ini mendukung efisiensi tinggi dan fleksibilitas pengukuran performa dengan sensor multi-titik pada berbagai bagian *engine*.

Tabel 1 Spesifikasi Engine

<i>Manufactured</i>	: <i>GE Aircraft Engines</i>
<i>Models</i>	: <i>CT7-9C</i>
<i>Compression Ratio</i>	: <i>18:1</i>
<i>Type of Compressor</i>	: <i>Combined Axial-Centrifugal</i>
<i>Number of Compressor</i>	: <i>Six Stage (five axial and one centrifugal)</i>

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan fokus pada pengujian performa dan fungsi *engine turboprop General Electric CT7-9C* yang digunakan pada pesawat CN235. Pengujian dilakukan oleh teknisi di *engine test cell* dengan simulasi kondisi operasional pesawat, sehingga data yang diperoleh mencerminkan kinerja *engine* secara nyata setelah proses MRO[7]. Proses pengujian dilakukan dengan menjalankan *engine* pada berbagai kondisi beban, mulai dari *idle* hingga *auto power reverse*.

Analisis ini difokuskan pada analisis efisiensi *gearbox*, yang berhubungan langsung dengan SHP yang dihasilkan oleh *engine*.

Rumus untuk menghitung efisiensi *gearbox* adalah:

$$\text{Efisiensi Gearbox}(\eta) = \frac{\text{Output Power}}{\text{Input Power}} \times 100\%(3)$$

Di mana efisiensi *gearbox* (η) mengukur seberapa baik torsi yang dihasilkan oleh *engine* ditransmisikan ke sistem propulsi pesawat. Analisis ini mengukur torsi pada berbagai kondisi beban, mulai dari *idle* hingga *auto power reverse*.

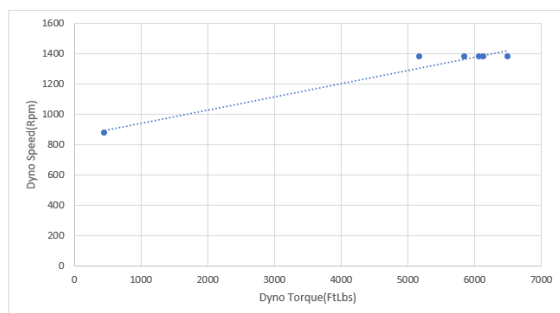
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 Data Performance Test [8]

PERFORMAN CE POINT	GRND_1 DL	TRIM	CRUIS E1	CRUIS E2	TAKE_ OFF	AUTO_ PR
Dyno Torque (FTLbs)	462.24	6084	5175.9	5855.8	6143.4	6500.7
Engine Torque (FTLbs)	39.905	395.13	339.21	380.84	399.2	419.44
Dynamometer Speed (Rpm)	875	1377.3	1377.4	1374.6	1374.1	1374.1
Gas Generator Speed (Rpm)	32047	43674	42768	43502	43649	43993
Gas Generator Speed (%)	72.463	97.661	95.639	97.277	97.606	98.378
Power Turbine Speed (Rpm)	13987	21975	21974	21927	21929	21928
Power Turbine Speed (%)	63.583	99.884	99.894	99.671	99.671	99.669
SHP Engine (HP)	106.274	1653.2	1419.2	1590	1666.8	1751.2
SHP Dyno (HP)	77.010	1595.4	1357.4	1532.6	1607.32	1700.8
Efisiensi Gear Box (%)	72.464	96.504	95.646	96.391	96.4312	97.12
Engine Oil Temp (Deg F)	131.42	177.58	177.13	177.35	177.78	177.61
Gear Box Oil Temp (Deg F)	93.811	147.79	146.82	147.82	147.55	147.86

Putaran

Dari tabel hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa *engine* mampu beroperasi secara optimal, yang ditunjukkan dengan rata-rata kecepatan *engine* sebesar 20620 rpm, yang hampir mencapai kecepatan maksimumnya.



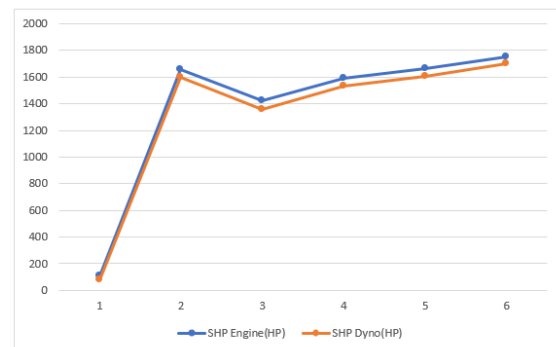
Gambar 2 Kurva RPM dengan Torsi

Grafik di atas memperlihatkan hubungan antara torsi dan rpm pada *engine* pesawat saat dilakukan pengujian menggunakan *dynamometer*. Dalam uji ini, torsi pada *mesin* divariasikan dan diamati dampaknya terhadap kecepatan putaran mesin (rpm), terutama ketika *engine* beroperasi pada batas maksimum kemampuannya. Mesin pesawat membutuhkan paduan torsi dan rpm yang optimal untuk menghasilkan tenaga secara efisien; semakin besar torsi yang dihasilkan oleh *engine*, maka biasanya rpm juga meningkat hingga titik tertentu. Hal ini terlihat pada grafik, di mana tiap penambahan torsi umumnya diikuti oleh kenaikan rpm, sehingga tercipta hubungan langsung antara kedua parameter tersebut. Proses pengujian semacam ini penting dilakukan untuk mengetahui

karakteristik performa *engine*, tidak hanya untuk memastikan efisiensi kerja, tetapi juga untuk menjaga kestabilan rpm dan torsi agar *engine* mampu merespons kebutuhan beban saat bekerja pada pesawat. Dengan demikian, dinamika torsi dan rpm pada *engine* pesawat merupakan hal utama yang harus dijaga agar *engine* mampu menghasilkan tenaga maksimal pada berbagai kondisi operasional dan memastikan keamanan serta kenyamanan penerbangan.

SHP

Pencarian SHP pada berbagai titik performa, mulai dari *idle* hingga *auto power reverse*. Di mana torsi dan kecepatan poros diukur pada pengujian di *engine test cell*. SHP Dyno dihitung berdasarkan data torsi dan kecepatan poros yang diperoleh dari dynamometer, sedangkan SHP Engine dihitung dari daya yang dihasilkan *engine* pada kondisi operasional tertentu. Dengan membandingkan nilai SHP pada kondisi *idle*, *trim*, *take-off*, dan *auto power reverse*, analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi *gearbox* dalam mentransmisikan daya *engine* ke sistem propulsi pesawat.

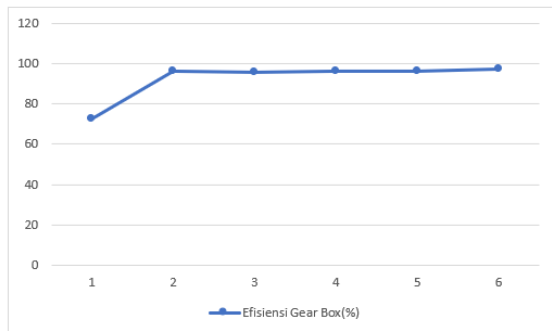


Gambar 3 Kurva SHP Engine Terhadap SHP Dyno

Grafik di atas menunjukkan bahwa baik SHP Engine (garis biru) maupun SHP Dyno (garis oranye) mengikuti tren yang serupa, dengan nilai SHP meningkat secara stabil hingga mencapai sekitar kurang lebih 1600 HP sebelum akhirnya stabil. SHP Engine adalah tenaga yang dihasilkan secara teoritis oleh mesin pesawat pada poros *output*, dihitung berdasarkan parameter ideal seperti torsi dan rpm tanpa memperhitungkan kehilangan mekanis. Sementara itu, SHP Dyno merupakan tenaga yang diukur langsung oleh *dynamometer* selama pengujian mesin dalam kondisi nyata. Nilai SHP Dyno biasanya lebih rendah dibandingkan dengan SHP Engine karena adanya faktor-faktor kehilangan dalam sistem seperti gesekan pada *bearing*, transmisi, serta ketidakefisienan mekanis

lainnya. Kesalahan pengukuran, kebocoran, kualitas *setting* alat ukur, hingga *fuel system* juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran daya pada *dynamometer*. Selama pengujian, perbedaan antara SHP *Engine* dan SHP *Dyno* sangat penting untuk dianalisis. Jika selisihnya terlalu besar, bisa menandakan adanya kendala mekanis atau masalah efisiensi yang perlu diperbaiki sebelum mesin digunakan di pesawat.

Efisiensi Gearbox



Gambar 4. Kurva Efisiensi Setiap Point Pengujian

Dari grafik diatas efisiensi *gearbox* pada *engine* CT7-9C menunjukkan pola peningkatan yang jelas, dimulai dari titik paling rendah saat *idle*, kemudian naik dan stabil di atas 95% pada pengujian *trim*, *cruise*, *take off*, hingga *auto power reverse*. Pada posisi *idle*, pemborosan mekanis dan gesekan internal lebih dominan[9], sehingga efisiensi berada di kisaran 72%. Sebaliknya, pada titik-titik dengan beban lebih tinggi, proporsi transfer tenaga terhadap *losses* mekanis semakin membaik karena pelumasan, *oil film*, dan distribusi gaya telah optimal, sehingga efisiensi *gearbox* mendekati ideal.

Variasi efisiensi *gearbox* pada saat pengujian *engine* pesawat umumnya disebabkan oleh beberapa faktor utama. Pada putaran rendah (*rpm* rendah), efisiensi *gearbox* cenderung lebih rendah karena gesekan internal masih dominan, pelumas belum sepenuhnya mencapai suhu kerja optimal, dan komponen *gear* belum saling "menyesuaikan" secara termal sehingga *losses* mekanis masih tinggi. Seiring kenaikan *rpm* dan beban *output*, pelumas menjadi lebih cair dan mampu membentuk lapisan *film* yang lebih stabil di antara permukaan gigi dan bearing. Hal ini menurunkan gesekan serta meminimalkan kerugian energi akibat panas, membuat efisiensi meningkat dan cenderung stabil pada *rpm* yang lebih tinggi.

Desain rasio *gear* juga punya pengaruh besar terhadap efisiensi. Rasio gear yang tidak tepat bisa menyebabkan pemborosan energi, keausan yang

tidak merata, dan distribusi beban yang tidak optimal pada gigi *gear*. Selain itu, variasi beban dinamis selama pengujian (perubahan torsi secara tiba-tiba) dapat menimbulkan fluktuasi pada kontak gigi. Faktor lain seperti kekasaran permukaan gigi, akurasi manufaktur, serta *stiffnes* struktur penopang dan posisi gigi juga berpengaruh langsung pada efisiensi secara dinamis. Semua faktor ini menjadi alasan utama mengapa efisiensi *gearbox* dapat berbeda-beda pada tiap tahapan pengujian engine pesawat.

KESIMPULAN

Engine CT7-9C yang diuji di *test cell* PT. Nusantara Turbin dan Propulsi dinyatakan layak digunakan kembali karena seluruh parameter performa utama telah memenuhi standar operasional pabrikan. Efisiensi *gearbox* yang dihitung dari selisih torsi *input-output* juga menunjukkan transmisi daya yang sangat baik, dengan efisiensi lebih dari 95% pada *power setting* utama, meski efisiensi sedikit menurun pada *idle* akibat dominasi *losses* mekanis. Pengujian menyeluruh terhadap parameter *speed*, *rpm*, *fuel flow*, *pressure*, dan SHP berhasil memberikan gambaran akurat tentang kemampuan *engine* di berbagai kondisi beban, di mana variasi efisiensi dan performa sangat dipengaruhi oleh faktor desain *gear*, pelumasan, distribusi beban, dan temperatur pelumas pada tiap mode operasi *engine*. Dengan demikian, *performance test* dan analisis efisiensi *gearbox* terbukti krusial dalam memastikan keandalan, keselamatan, serta pemeliharaan sistem propulsi pesawat CN235, sekaligus menegaskan efektivitas program pengujian kinerja di PT. Nusantara Turbin dan Propulsi bagi kelangsungan operasi penerbangan pesawat *turboprop* CN235.

UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih kepada PT. NUSANTARA TURBIN DAN PROPULSI yang sudah mengizinkan untuk melihat proses pengujian *engine* dan mengolah data hasil pengujian *engine* dan Universitas Pertahanan RI yang sudah menyediakan tempat yang nyaman untuk Saya dapat menulis hasil analisis data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Naseri, S. Sammak, M. Boroomand, A. Alihosseini, and A. M. Tousi, "Experimental

- Investigation of Inlet Distortion Effect on Performance of a Micro Gas Turbine,” vol. 140, no. September, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1115/1.4039057.
- [2] Andi Dwi Apriansyah, M. Maridjo, and I. Yuliyani, “Analisis Power Acceptance Engine Dart7 Mk 534-2 Di Departemen Test Cell Pt. Nusantara Turbin Dan Propulsi,” *J. Tek. Energi*, vol. 12, no. 1, pp. 24–29, 2023, doi: 10.35313/energi.v12i1.5047.
- [3] D. Atmaji, A. A. Noviyanti, and W. Juliani, “Implementation of Maintenance Scenario for Critical Subsystem In Aircraft EngiDwi Atmaji, F. T., Noviyanti, A. A., & Juliani, W. (2017). Implementation of Maintenance Scenario for Critical Subsystem In Aircraft Engine: Case Study NTP CT7 Engine. Internati,” *Int. J. Innov. Enterp. Syst.*, vol. 1, no. 02, p. 52, 2017.
- [4] D. Carkner, *Green technology*, vol. 26, no. 3. 2010. doi: 10.1002/j.2637-496x.2010.tb00234.x.
- [5] H. Prayitno, G. Sakti, A. Zulkarnain, and H. L. Latif, *Aircraft Maintenance Management*. EUREKA MEDIA AKSARA, 2024.
- [6] Made Work Order WIP Number: 487004.
- [7] Overhaul Manual engine CT7-9C.
- [8] P. Kapabilitas, T. Dan, D. Pemeliharaan, and E. Makilla, “Peningkatan kapabilitas turbin dan propulsi dalam pemeliharaan engine makilla series,” *J. TNI Angkatan Udar.*, vol. 2, no. 2, 2023.
- [9] R. S. R. A, C. B. A, A. W. N, and H. Prayitno, “Analisis Dinamika Performa Engine Turbofan Pada Boeing 737- 300 Dalam Kondisi Idle Hingga Take-Off,” vol. 5, no. 1, pp. 432–439, 2025.

IMPLEMENTASI *INTERNET OF THINGS* PADA ALAT PRAKTIKUM VISKOMETER UNTUK PEMBELAJARAN FISIKA

Isma Dwi Puspitasari¹, Adian Aristia Anas¹, Dwi Arnoldi¹

¹ Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139, Indonesia

Adian1087@gmail.com¹

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* yang dapat membantu mahasiswa lebih paham soal pengukuran kekentalan cairan. Alat bantu praktikum viskometer ini dibuat menggunakan sensor *infrared*, motor DC dan komponen lainnya dengan menggunakan *platform* aplikasi *Blynk*. Konsep dari viskometer ini adalah viscometer *spindle*, dilakukan penelitian dari Mei sampai Juli 2025 lewat eksperimen. Pengujiannya menggunakan tiga jenis fluida dan tiga jenis suhu, nilai viskositasnya sebagai berikut: air bersih pada 28°C (0,00083 Pa.s), 40°C (0,00066 Pa.s), 60°C (0,00044 Pa.s); minyak goreng pada 28°C (0,0388 Pa.s), 40°C (0,0249 Pa.s), 60°C (0,0164 Pa.s); SAE 10W-30 pada 28°C (0,0936 Pa.s), 40°C (0,0634 Pa.s), 60°C (0,0406 Pa.s). Alat ini akurat sampai 96,34%, alat bantu praktikum viskometer ini sangat efektif dan efisien dalam pembelajaran bagi mahasiswa dalam melakukan praktikum.

Kata kunci : viskositas, viskometer, fluida, internet of things.

Abstract

This study aims to design and develop an internet of things (IoT)-based viscometer as a practical learning tool to help students better understand the measurement of fluid viscosity. The viscometer is constructed using an infrared sensor, a DC motor, and other supporting components, integrated with the blynk application platform. The concept applied in this device is a spindle-type viscometer. The research was conducted from May to July 2025 using an experimental method. The testing was carried out using three types of fluids at three different temperatures. The viscosity values obtained are as follows: distilled water at 28°C (0.00083 Pa·s), 40°C (0.00066 Pa·s), and 60°C (0.00044 Pa·s); cooking oil at 28°C (0.0388 Pa·s), 40°C (0.0249 Pa·s), and 60°C (0.0164 Pa·s); and SAE 10W-30 oil at 28°C (0.0936 Pa·s), 40°C (0.0634 Pa·s), and 60°C (0.0406 Pa·s). The developed device achieved an accuracy level of 96.34%, indicating that the IoT-based viscometer is highly effective and efficient as a learning aid for students in conducting practical experiments.

Key words : viscosity, viscometer, fluid, internet of things.

PENDAHULUAN

Fisika merupakan cabang ilmu yang mempelajari materi, sifat, perubahan, dan energi yang dihasilkan [1]. Di dunia pendidikan, praktikum fisika penting banget buat bantu siswa memahami konsep teori fisika lewat situasi nyata. Salah satu topik yang sering dibahas adalah viskositas, yang mengukur seberapa kental suatu cairan [2]. Di labororium Fisika Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya keterbatasan alat praktikum terutama viskometer yang menyebabkan proses pembelajaran kurang optimal. Viskometer adalah alat yang mengukur tingkat kekentalan atau viskositas, padahal alat ini penting membuat mata

kuliah fisika rekayasa yang mempunyai bobot 2 SKS, dengan 1 SKS teori dan 1 SKS praktikum. Biasanya, alat yang dipake untuk mengukur viskositas adalah viskometer.

Saat ini, dengan majunya teknologi, konsep *Internet of Things* atau IoT mulai banyak dikembangkan. IoT itu sistem di mana benda-benda bisa saling mengirim data melalui jaringan tanpa perlu interaksi langsung manusia ke manusia atau manusia ke komputer[3]. Sistem ini menggunakan sensor dan software untuk komunikasi, kontrol, hubungin, dan tukar data dengan perangkat lain yang terhubung internet. Oleh karena itu, atasi kekurangan alat di lab, perlu penelitian dan rancang viskometer yang memanfaatkan IoT. Viskometer ini bisa dibuat sebagai alat bantu praktikum yang terintegrasi dengan aplikasi *Blynk*. *Blynk* merupakan

aplikasi yang bisa digunakan melalui perangkat android maupun IOS, aplikasi ini mempermudah pengguna mengembangkan dan mengontrol proyek-proyek Internet of Things dari perangkat yang terdaftar[4].

Pada penelitian ini, komponen yang digunakan untuk membuat rancangan viskometer ini yaitu: Motor DC 12V yang memiliki fungsi memutar batang pengaduk didalam fluida, motor driver atau modul driver untuk mengontrol kecepatan dan arah motor DC12V, Sensor Arus DC INA219 ialah sensor yang dapat mengukur arus tegangan, Sensor *Infrared* memiliki fungsi mendeteksi objek gerak pada suatu alat ataupun komponen, Modul WiFi ESP32 ialah board yang berbasis *chip* ESP32 dengan memiliki kemampuan untuk menjalankan mikrokontroler, WiFi, dan bluetooth[5], Arduino UNO R3 dapat mengontrol dan memproses input untuk menjalankan program untuk mengendalikan komponen elektronik[6], dan batang pengaduk yang berfungsi untuk mengaduk fluida pada saat pengujian.

Penelitian ini dilakukan proses pengujian terhadap perangkat yang telah dibuat menggunakan fluida (air bersih, minyak goreng, dan SAE 10W-30) dengan masing-masing suhu (28°C, 40°C, dan 60°C). Oleh karena itu, penelitian sangat penting untuk mengatasi kekurangan alat pengukur viskositas di laboratorium fisika teknik mesin politeknik negeri sriwijaya, diperlukan penelitian dan pengembangan viskometer yang menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT). Viskometer tersebut bisa dibuat sebagai alat pendukung praktikum yang terhubung dengan aplikasi *Blynk*. Dengan ini, mahasiswa akan lebih mudah memahami prinsip viskositas saat melakukan praktikum fisika dasar dan hasil pengukuran viskositas dapat dipantau secara langsung dan disimpan dalam bentuk digital, sehingga mahasiswa lebih mudah menganalisis serta memproses datanya.

METODE PENELITIAN

Pembuatan alat praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* ini dilakukan di bengkel *Maintenance and Repair* Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya. Dalam waktu pengerjaan selama 4 bulan dari Maret-Juli 2025. Metode yang diterapkan yaitu kuantitatif eksperimen, penelitian yang melakukan analisis dengan cara perbandingan pada sampel dan perbandingan tersebut disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah pemahaman interpretasi data yang diperoleh. Hasil pengambilan data dan sampel akan dianalisis untuk mengetahui Tingkat ketelitian

alat hasil perancangan alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things*.

Alat dan Bahan

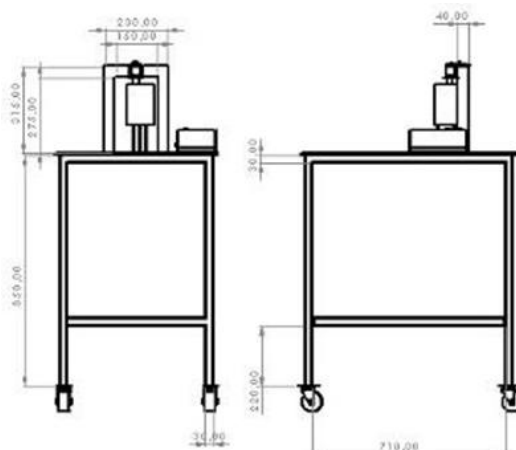
Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk membuat perancangan alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* sebagai berikut :

Tabel 1 Alat dan Bahan

Alat	Bahan
Sensor <i>Infrared</i>	Air Bersih
Motor DC 12V	Minyak Goreng
Motor <i>Driver</i>	SAE 10W-30
Sensor INA219	<i>Beaker Glass/Pyrex</i>
Arduino Uno R3	Metanol
Modul WiFi ESP32	Termometer
LCD 16x02	
<i>SmartPhone</i>	
Batang Pengaduk	

Perancangan Alat

Dalam proses perencanaan pembuatan alat ini, elemen paling krusial dan esensial adalah menyusun desain serta prinsip pengoperasian alat tersebut. Pendekatan ini akan memfasilitasi pemahaman mendalam terhadap mekanisme kerja dan berbagai fungsi alat yang akan dikembangkan. Desain konstruksi alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* ini dikembangkan dengan memanfaatkan perangkat lunak SolidWorks 2022. Berikut ini merupakan Desain 2D alat praktikum viscometer berbasis *Internet of Things*.



Gambar 1 Desain 2D alat praktikum viskometer berbasis *Internet of things*

Alat bantu praktikum viskometer berbasis IoT memiliki berbagai komponen dengan fungsi spesifik, dimulai dari *clamp spindle* yang berperan memegang dan menahan motor spindle, motor DC

yang menggerakkan pengaduk, serta pengaduk itu sendiri yang digunakan untuk mengaduk fluida di dalam *beaker glass* atau *pyrex* sebagai wadah untuk fluida atau cairan yang akan diuji. Selain itu, terdapat penopang *beaker glass* yang menopang *pyrex* saat pemanasan menggunakan metanol, panel box untuk menyimpan dan menjaga komponen elektrik agar aman, serta roda yang memudahkan pergerakan dan perpindahan alat.

Komponen elektronik meliputi Arduino Uno R3 sebagai pusat kontrol, sensor arus DC INA219 dan sensor *infrared* yang mendeteksi gerakan pada fluida, modul *Driver* yang mengontrol motor DC, LCD 16x02 untuk menampilkan hasil pengukuran viskositas, serta modul Wi-Fi NodeMCU ESP32 sebagai media penghubung ke aplikasi *Blynk* dan otak dari seluruh program IoT. Serta komponen-komponen elektrik tersebut akan dimasukkan kedalam box panel untuk menyimpan atau menjaga agar tetap aman.

Sistem Kerja

Sistem kerja pada alat viskometer menggunakan adaptor yang berfungsi sebagai sumber daya utama, yang mengubah tegangan AC menjadi DC untuk mensuplai seluruh komponen elektronik, khususnya Arduino Uno dan modul WiFi NodeMCU ESP32. Pengendalian alat dilakukan melalui aplikasi *blynk* pada *smartphone*, yang mengirimkan perintah melalui jaringan internet ke modul WIFI yang terhubung dengan mikrokontroler.

Arduino Uno menerima perintah tersebut dan mengirimkan sinyal ke motor *driver*. Kecepatan putar motor dikendalikan sesuai input dari pengguna pada aplikasi *blynk*. Sensor *infrared* akan mengukur kecepatan putaran motor (RPM), sedangkan sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan, serta arus listrik yang kemudian digunakan untuk mendeteksi atau menghitung daya Listrik motor (p) dan pada akhirnya menghasilkan torsi (τ).

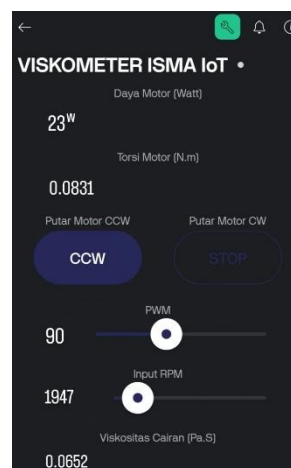
Data dari sensor-sensor tersebut diproses oleh modul WiFi NodeMCU ESP32 dan Arduino Uno R3 melalui jaringan internet. Aplikasi *Blynk* di *smartphone* yang terhubung akan menerima data hasil pengukuran viskositas fluida (μ). Selain itu, hasil pengukuran viskositas ditampilkan pada layar LCD 16x02.

Proses Pengujian

Dalam proses pengujian Pastikan sensor-sensor dan mikrokontroler sudah terhubung ke aplikasi *Blynk*, serta pastikan suhu yang digunakan sesuai untuk keperluan pengujian dan pastikan jaringan WiFi lancar. Selanjutnya, tekan tombol putaran motor dan RPM di aplikasi *Blynk* untuk memulai proses pengukuran. Saat tombol tersebut ditekan, motor akan berputar secara otomatis, dan

alat bantu akan mengukur viskositas fluida tersebut. Hasil pengukuran viskositas fluida akan ditampilkan di aplikasi *blynk* seperti gambar 2.

Lakukan tiga kali pengujian pada setiap fluida dengan berbeda suhu dan lakukan kalibrasi motor DC menggunakan Tachometer guna memastikan kestabilan (RPM) dan meningkatkan akurasi serta validitas data yang dihasilkan nantinya, serta lakukan kalibrasi pada sensor-sensor terutama sensor INA219 untuk memastikan keakuratan pengukuran arus tegangan yang digunakan dalam perhitungan daya motor, biasanya sensor dikalibrasi menggunakan Multimeter Digital.



Gambar 2 Hasil pengujian alat praktikum viskometer menggunakan aplikasi *blynk*

Analisis Data

Viskositas ialah suatu ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar ataupun kecilnya gesekan yang terdapat didalam fluida[7]. pengukuran viskositas pada penelitian ini berdasar pada prinsip kerja viskometer rotasi, yaitu hubungan antara torsi, kecepatan putaran, dan sifat fluida. Secara fisika, fluida dengan viskositas yang lebih tinggi akan memberikan hambatan yang lebih besar terhadap gerakan, sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk memutar pengaduk pada kecepatan tertentu.

Hubungan antara torsi dan viskositas dapat dinyatakan bahwa torsi berbanding lurus dengan viskositas fluida dan kecepatan sudut. Dengan demikian, viskositas dapat ditentukan dari hasil pengukuran torsi dan kecepatan putaran motor. Dalam penelitian ini, kecepatan putaran motor diukur dalam satuan (RPM). Nilai (RPM) selama pengujian tidak selama nya konstan, karena dipengaruhi oleh beban fluida, karakteristik motor, dan kondisi sistem secara keseluruhan. Meskipun demikian, nilai RPM diukur secara *real-time* menggunakan sensor dan langsung digunakan dalam perhitungan.

Nilai torsi tidak diukur secara langsung melainkan dihitung berdasarkan daya (p) dan kecepatan putaran motor (n). Nilai daya listrik kemudian dikonversi ke satuan (HP) digunakan sebagai perhitungan torsi. Namun demikian, secara teoritis daya listrik yang masuk motor tidak seluruhnya dikonversi menjadi daya mekanik akibat adanya rugi-rugi energi seperti panas gesekan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini mengasumsikan bahwa daya listrik setara dengan daya mekanik (efisiensi 100%), yang berpotensi menimbulkan bias pada hasil perhitungan torsi.

Selanjutnya, nilai torsi yang diperoleh digunakan dalam perhitungan viskositas dengan menggunakan persamaan berikut [8]:

$$\mu = \frac{\tau \ell}{4\pi^2 R^3 n L} \dots\dots\dots(1)$$

mencari rumus torsi (τ) sebagai berikut:

$$\tau = \frac{5.252 \times p}{n} \dots\dots\dots(2)$$

$$p = V \times I \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

μ : Koefisien Viskositas (Pa.s)

τ : Torsi (N/m)

L : Tinggi *Beaker Glass*, 0.12 m

R : Diameter Pengaduk, 0.05 m

ℓ : Cella Diameter 0.015 m

n : Putaran Motor (RPM)

p : Daya Motor (HP)

V : Tegangan

I : Arus

Lakukan analisis deskriptif kuantitatif terhadap data yang dikumpulkan. Perbandingan dilakukan untuk meningkatkan tingkat kedekatan hasil dengan data dari viskositas pada penelitian terdahulu. Berdasarkan hasil analisis tersebut, simpulan diambil mengenai akurasi alat bantu praktikum viskometer. Berikut adalah kriteria persentase[9]:

Tabel 2 Kriteria persentase

Persentase	Kriteria
0% - 20%	Sangat tidak layak
21% - 40%	Tidak layak/ tidak baik
41% - 60%	Cukup layak/cukup baik
61% - 80%	Layak/baik
81 - 100%	Sangat layak/sangat baik

Berdasarkan kriteria presentase yang telah ditetapkan, alat praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* dianggap layak jika presentase penilaiannya mencapai atau melebihi 61%. Data yang didapat dari hasil pengujian alat ini dianalisis untuk mengetahui tingkat ketelitiannya melalui metode berikut ini[9]:

1. Ketidakpastian (Δx)

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \dots\dots\dots(4)$$

2. Standar error

$$SE = (\Delta x / \bar{x}) \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

3. Taraf ketelitian (TK)

$$TK = (100 - SE)\% \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

Δx = ketidakpastian data x

x_{\max} = data x maksimal

x_{\min} = data x minimal

\bar{x} = nilai x rata-rata

SE = Standart error

TK = Taraf ketelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

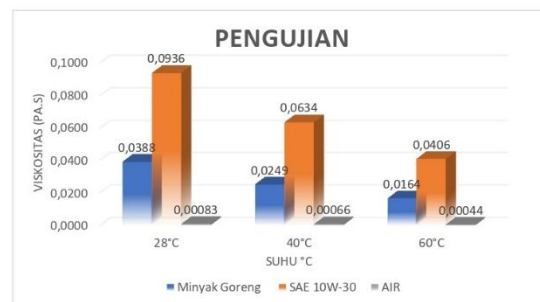
Hasil Pengujian Pada Alat Praktikum Viskometer Berbasis *Internet of Things*

Pengujian alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* dilakukan untuk membandingkan hasil dari viskositas yang ada pada fluida dengan hasil pengukuran alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* ini. Pada pengujian ini, ada tiga fluida sebagai variabel independen (air bersih, minyak goreng, dan SAE 10W-30) dan tiga suhu sebagai variabel independen (28°C, 40°C, dan 60°C) yang digunakan untuk menguji alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things*, dengan tiga kali pengukuran pada variabel suhu. Hasil dari pengukuran dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Hasil pengujian alat bantu viskometer berbasis *Internet of Things*

Fluida	Suhu (°C)	Torsi (N.m)	Viskositas (Pa.s)
Air Bersih	28°C	0,0306	0,00084
		0,0307	0,00084
		0,0319	0,00080
	40°C	0,0263	0,00065
		0,0271	0,00068
		0,0265	0,00064
	60°C	0,0235	0,00044
		0,0235	0,00044
		0,0234	0,00044
Minyak Goreng	28°C	0,0652	0,0399
		0,0627	0,0370
		0,0649	0,0396

	40°C	0,0515	0,0249
		0,0515	0,0249
		0,0515	0,0249
	60°C	0,0438	0,0180
		0,0408	0,0156
		0,0409	0,0157
SAE 10W-30	28°C	0,0981	0,0864
		0,1074	0,1081
		0,0982	0,0864
	40°C	0,0813	0,0612
		0,0831	0,0652
		0,0824	0,0638
	60°C	0,0660	0,0410
		0,0660	0,0411
		0,0650	0,0398



Gambar 3 Grafik pengujian alat bantu praktikum viskometer

Tabel 4 Rata-Rata Hasil Pengujian

Fluida	Suhu	Viskositas
Air Bersih	28°C	0,00083
	40°C	0,00066
	60°C	0,00044
Minyak Goreng	28°C	0,0388
	40°C	0,0249
	60°C	0,0164
SAE 10W-30	28°C	0,0936
	40°C	0,0634
	60°C	0,0406

Viskositas Air bersih pada suhu 28°C sebesar 0,00083 Pa.s, suhu 40°C 0,00066 Pa.s, dan suhu 60°C 0,00044 Pa.s. Pada suhu 28°C dengan hasil viskositas sebesar 0,00083 Pa.s [10], dan suhu 40°C, 60°C) menunjukkan bahwa viskositasnya sebesar 0,00065 Pa.s, 0,00046 Pa.s[11].

Viskositas minyak goreng pada suhu 28°C yaitu 0,0388 Pa.s, sedangkan pengujian yang dilakukan di laboratorium kimia Polstri menggunakan viskometer bola jatuh dengan hasil viskositas 0,0388 Pa.s.

Viskositas dari SAE 10W-30 pada suhu 28°C yaitu 0,0936 Pa.s, suhu 40°C 0,0634 Pa.s, dan suhu 60°C 0,0406 Pa.s. Sedangkan pada suhu 28°C dengan viskositas 0,0930 Pa.s, suhu 40°C dengan viskositas 0,0633 Pa.s, dan suhu 60°C dengan viskositas 0,0402 Pa.s[8]

Hasil Analisis Taraf Ketelitian Alat Bantu Praktikum Viskometer Berbasis *Internet of Things*

Dari perbandingan pada gambar 3 menunjukkan bahwa suhu dapat mempengaruhi suatu viskositas fluida, semakin tinggi suhu semakin turun juga viskositas fluida. Pada tabel 5 data yang diperoleh alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* yang dianalisis untuk menentukan tingkat ketelitiannya menggunakan rumus (4), (5), dan (6).

Berikut ini merupakan salah satu contoh perhitungan untuk air bersih pada suhu 28°C:

Ketidak Pastian (Δx)

$$\Delta x = \frac{0,00084 - 0,00080}{2} = 0,0002 \dots\dots\dots(7)$$

Standar error

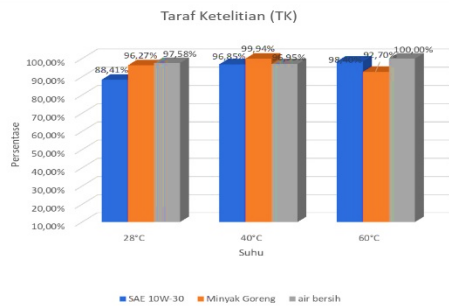
$$SE = (0,0002 / 0,00083) \times 100\% = 2,4\% \dots(8)$$

Taraf ketelitian (TK)

$$TK = (100 - 2,4)\% = 97,58\% \dots\dots\dots(9)$$

Tabel 5 Tingkat Ketelitian Alat Bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things*

Fluida	Suhu	KP	SE	TK
Air Bersih	28°C	0,0002	2,4%	97,58%
	40°C	0,00	3,0%	96,95%
	60°C	0	0,0%	100,00%
Minyak Goreng	28°C	0,0014	3,7%	96,27%
	40°C	0,00	0,1%	99,94%
	60°C	0,0012	7,3%	92,70%
SAE 10W-30	28°C	0,0109	11,59%	88,41%
	40°C	0,0020	3,15%	96,85%
	60°C	0,0007	1,60%	98,40%
Rata-rata				96,34%



Gambar 4 Grafik Taraf Ketelitian Alat Bantu Praktikum Viskometer Berbasis *Internet of Things*

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 6, mendapatkan nilai tingkat ketelitian (TK) alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things* pada tiga jenis fluida yaitu, air bersih minyak goreng, dan oli SAE 10W-30 dengan variasi suhu 28°C, 40°C, dan 60°C. Parameter yang dianalisis meliputi Ketidak Pastian (KP), Standar Error (SE), dan Taraf Ketelitian (TK). Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai taraf ketelitian alat berada pada rentang 88,41%-100%, dengan nilai rata-rata 96,34%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa alat yang dikembangkan memiliki Tingkat akurasi yang tinggi dan dapat dikategorikan sangat layak digunakan dalam kegiatan praktikum.

Pada pengujian fluida air bersih, diperoleh Tingkat ketelitian yang sangat tinggi yaitu sebesar 97,58% pada suhu 28°C, 96,95% pada suhu 40°C, 100% pada suhu 60°C. Nilai ini menunjukkan bahwa alat mampu bekerja dengan sangat baik pada fluida dengan viskositas rendah, tidak adanya nilai kesalahan (SE = 0%) pada suhu 60°C mengindikasikan bahwa hasil pengukuran alat identik dengan nilai acuan, sehingga menghasilkan ketelitian maksimum.

Sementara itu, pada fluida minyak goreng nilai ketelitian cenderung bervariasi, 96,27% pada suhu 28°C, pada suhu 40°C meningkat menjadi 99,94%, dan menurun menjadi 92,70% pada suhu 60°C dengan adanya nilai kesalahan (SE = 7,3%) bahwa perubahan viskositas yang signifikan serta kemungkinan adanya faktor eksternal seperti kestabilan sensor ataupun hal lainnya.

Pengujian oli SAE 10W-30, mendapatkan nilai ketelitian sebesar 88,41% pada suhu 28°C, 96,85% pada suhu 40°C, dan 98,40% pada suhu 60°C. Nilai ketelitian terendah pada suhu 28°C yang disebabkan oleh nilai eror yang cukup tinggi (SE = 11,59%). Kondisi ini menunjukkan bahwa alat mengalami keterbatasan dalam mengukur fluida dengan viskositas tinggi pada suhu rendah, fluida cenderung lebih kental sehingga dapat mempengaruhi kinerja sensor dan sistem pembacaan.

Secara keseluruhan hubungan antara Ketidak pastian (KP), Standar Error (SE), dan Tingkat Ketelitian (TK) menunjukkan bahwa, semakin kecil nilai (SE) maka nilai (TK) semakin tinggi. Hal ini sejalan dengan konsep dasar pengukuran, Tingkat ketelitian berbanding terbalik dengan besarnya kesalahan. Nilai (KP) mendekati 0 pada sebagian besar pengujian dapat menunjukkan bahwa hasil pengukuran alat memiliki deviasi yang sangat kecil terhadap referensi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet Of Things* yang di kembangkan memiliki performa yang baik dengan Tingkat ketelitian rata-rata sebesar 96,34%. Mengacu pada kriteria kelayakan alat, Tingkat ketelitian dalam rentang 81%-100% dikategorikan sangat layak[9]. Maka alai ini dapat dinyatakan sangat layak digunakan sebagai media pembelajaran dan praktikum fisika, terkhususnya dalam pengukuran viskositas fluida.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan untuk alat bantu praktikum viskometer berbasis *Internet of Things*, mahasiswa lebih mudah memahami materi fisika dasar seperti viskositas terhadap fluida cair. Hasil pengujian alat tersebut menunjukkan tingkat ketelitiannya yang sangat layak berkisaran 88,41%-100% dengan rata-rata 96,34%. Hal ini mengindikasikan bahwa alat ini sangat baik untuk digunakan dalam melakukan praktikum. juga keunggulan menggunakan aplikasi dapat meminimalisir kesalahan manusia dan alat ini sangat efektif untuk melakukan praktikum.

SARAN

Alat ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, khususnya pada integrasi sistem pemanas elektrik (*electric heater*) serta penambahan sensor suhu seperti termokopel. Pengembangan tersebut bertujuan agar pengendalian dan pemantauan suhu dapat dilakukan secara otomatis melalui aplikasi blynk, sehingga meningkatkan efisiensi dan lebih akurasi dalam pengoperasian alat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Agustian, A. A. Anas, R. Wilza, and A. Junaidi, "Perancangan Alat Praktikum Fisika Gerak Jatuh Bebas," *J. Ilm. Pendidik. Fis. dan Sains*, vol. 5, no. 3, pp. 212–221, 2024.

- [2] A. Malik, M. A. Hakiki, and N. Miyati, "Analysis Characteristics of Viscosity Coefficient Using Viscometer Stromer," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1402, p. 004085, 2019.
- [3] B. M. L. Putri, S. O. Putri, F. I. Muchtadi, and F. Mukhlis, "Pembuatan Prototipe Viskometer Bola Jatuh Menggunakan Sensor Magnet dan Bola Magnet," *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 5, no. 2, p. 101, 2015. doi: 10.5614/joki.2013.5.2.6..
- [4] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, 2023. doi: 10.3390/s23156739.
- [5] E. Umar and P. Swara, *Buku Pintar Fisika*. Jakarta: Niagara Swadaya, 2008.
- [6] Engineering ToolBox, "Water – Dynamic and Kinematic Viscosity at Various Temperatures and Pressures," *The Engineering ToolBox*, 2019. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html.
- [7] Junaidi and D. P. Yulian, *Project Sistem Kendali Elektronik Berbasis Arduino*. Lampung: CV. Anugrah Utama Raharja, 2018.
- [8] P. U. Rakhmawati, "Analisis Komunikasi Platform Internet of Things Aplikasi Blynk," *Jurnal Aplikasi Blynk*, vol. 9, no. 2502, pp. 40–46, 2024.
- [9] Riduwan, *Dasar-Dasar Statistik*. Bandung: Alfabeta, 2023.
- [10] T. Rahmadi, *Mengenal Apa itu Internet of Things*. Jakarta: TIGA Ebook, 2020.
- [11] Y. Çengel and J. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2013.

EVALUASI KINERJA DAN EFISIENSI POMPA SENTRIFUGAL PADA SISTEM PENGOLAHAN MINYAK MENTAH : STUDI KASUS PT. X

Surya Ramadhan Bhakti Saputra¹, Mochamad Febrian Adhi Patria²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia

Jl. Kaliurang km 14.5, Sleman, Yogyakarta 55584

² Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi

Jl. Sorogo No.1 Cepu, Jawa Tengah 58315

mochamad.patria@esdm.go.id²

Abstrak

Pompa sentrifugal P100/5 berfungsi memindahkan minyak mentah dari tangki *feed* ke sistem pengolahan minyak mentah di Kilang PT. X. Evaluasi kinerja dan efisiensi pompa perlu dilakukan untuk memastikan kelancaran dan efektivitas pengolahan minyak bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi kinerja pompa sentrifugal P100/5 berdasarkan kondisi operasi aktual. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan menghitung parameter kinerja pompa yang meliputi debit, head, dan daya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pompa sentrifugal P.100/5 (Ebara Corporation, 2007) dengan kapasitas 25 m³/h dan daya motor 15 kW memiliki efisiensi kinerja sebesar 40,94%. Nilai tersebut masih berada dalam kategori layak, namun belum optimal. Faktor utama yang memengaruhi rendahnya efisiensi adalah kondisi oversize, di mana kapasitas pompa lebih besar dibandingkan dengan kebutuhan aktual sistem. Kondisi ini menyebabkan pengaturan aliran dilakukan dengan metode *throttling*, yang meningkatkan *head loss* dan menurunkan efisiensi pompa. Upaya peningkatan kinerja dan efisiensi pompa dapat dilakukan melalui penyesuaian spesifikasi pompa agar mendekati kondisi *Best Efficiency Point* (BEP), pelaksanaan pemeliharaan rutin, pencegahan kavitasi, serta optimasi sistem operasi. Salah satu solusi yang paling efektif adalah penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) untuk mengatur kecepatan putar pompa agar sesuai dengan kebutuhan aktual, sehingga efisiensi energi dapat ditingkatkan dan kerugian sistem dapat diminimalkan.

Kata kunci : pompa sentrifugal, evaluasi kinerja, efisiensi, minyak mentah.

Abstract

Centrifugal pump P100/5 is used to transfer crude oil from the feed tank to the oil processing system at of Refinery PT.X. Evaluating performance and efficiency is essential to ensure the reliability and effectiveness of the processing operation. This study aims to evaluate the performance efficiency of centrifugal pump P.100/5 under actual operating conditions. The research employs a quantitative approach by calculating key performance parameters, including flow rate, head, and pump power. The results indicate that centrifugal pump P.100/5 (Ebara Corporation, 2007), with a design capacity of 25 m³/h and a motor power of 15 kW, has an efficiency performance of 40.94%. This value is still considered acceptable; however, it is not optimal. The primary factor affecting the low efficiency is the oversizing condition, where the pump capacity exceeds the actual system demand. As a result, flow regulation is carried out using a throttling method, which increases head loss and reduces pump efficiency. Several improvement strategies can be applied, including adjusting pump specifications to operate closer to the Best Efficiency Point (BEP), implementing routine maintenance, preventing cavitation, and optimizing system operation. Among these alternatives, the use of a Variable Frequency Drive (VFD) is identified as the most effective solution, as it allows the pump rotational speed to be adjusted according to actual demand, thereby improving energy efficiency and minimizing system losses.

Key words : centrifugal pump, evaluation of performance, efficiency, crude oil.

PENDAHULUAN

Pompa merupakan salah satu komponen penting di Kilang PT.X yang berfungsi memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lainnya melalui instalasi sistem perpipaan yang ditandai dengan terjadinya perubahan tekanan pada fluida di sisi isap (*suction*) dan sisi tekan (*discharge*)[1]. Pompa P.100/5 merupakan pompa sentrifugal yang digunakan untuk memindahkan minyak mentah (*crude oil*) dari tangki *feed* ke komponen lainnya dalam sistem pengolahan minyak mentah. Kinerja dan efisiensi pompa sentrifugal sangat memengaruhi kelancaran operasional kilang. Menurut penelitian dari *American Hydraulics Institute*, pompa mengonsumsi 20% dari total energi[2]. Oleh karena itu, perhitungan kinerja dan efisiensi pompa menjadi sangat krusial dalam upaya melakukan optimalisasi.

Secara umum, kinerja dan efisiensi pompa dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti jenis fluida, kapasitas, head pompa, daya poros, dan daya hidrolis [3]. Penurunan kinerja dan efisiensi pompa dapat disebabkan oleh beberapa hal seperti kavitasi, keausan impeller, kerusakan bearing, misalignment, *loose*, *fault*, *imbalance*, *water hammer*, aliran tidak normal dan ketidaksesuaian spesifikasi pompa dengan kondisi operasi aktual [4]. Pompa yang telah mengalami penurunan kinerja umumnya memiliki nilai efisiensi 50-60 % atau lebih rendah. Pergantian pompa harus dilakukan jika pompa memiliki efisiensi 10-25%[5]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi pompa sentrifugal crude oil P.100/5 di kilang minyak PT. X. Analisis ini meliputi pengukuran parameter operasional, perhitungan efisiensi, dan rekomendasi terkait kelayakan penggunaan pompa.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif di mana efisiensi pompa dihitung berdasarkan parameter hasil observasi, pengukuran, dan perhitungan. Adapun langkah awal dari penelitian ini adalah menentukan topik, studi literatur, mengambil data di lapangan, mengolah dan menganalisis data, menentukan kesimpulan, dan memberikan rekomendasi hasil penelitian. Lokasi penelitian difokuskan pada unit pompa sentrifugal dan sistem perpipaan yang digunakan pada crude oil di unit kilang PT. X.

Berikut ini terdapat beberapa persamaan yang digunakan dalam menghitung efisiensi pompa sentrifugal.

1. Kecepatan aliran fluida (V)

$$v = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

v = kecepatan (m/s)

Q = Debit ($\frac{m^3}{h}$)

A = luas penampang pipa (m)

2. Head

Head dapat didefinisikan sebagai energi per unit berat fluida, dengan satuan ukur meter atau kaki fluida. Dalam konteks pompa, head dihitung dengan menentukan selisih tekanan keseluruhan antara saluran masuk (isap) dan saluran keluar (tekan) fluida, asalkan pengukuran dilakukan pada ketinggian yang identic.[6]

- a) Persamaan head total pompa adalah:

$$H_{total} = H_s + H_p + H_v + H_l \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

Hs = Head Ketinggian

Hp = Head Tekanan

Hv = Head Kecepatan

Hl = Head Losses Mayor + Minor

- b) Persamaan head ketinggian pompa adalah:

$$H_s = Z_d - Z_s \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

Zd = ketinggian permukaan crude oil di tangki (m)

Zs = ketinggian titik masuk heat exchanger (m)

- c) Persamaan head tekanan adalah:

$$H_p = \frac{P_d - P_s}{\rho \cdot g} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

Pd: Tekanan pada titik discharge (Pa)

Ps: Tekanan pada titik suction (Pa)

ρ : Densitas fluida (kg/m^3)

g: Percepatan gravitasi ($9.81 m/s^2$)

- d) Persamaan head kecepatan adalah:

$$h_v = \frac{V_{davg}^2 - V_{savg}^2}{2g} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan :

V_{davg}^2 = Rata –

Rata kecepatan pada sisi discharge (m/s)²

V_{savg}^2 = Rata –

Rata kecepatan pada sisi suction (m/s)²

g = Percepatan gravitasi ($9.81 m/s^2$)

- e) Persamaan head losses mayor adalah:

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

- hf = Kerugian mayor dalam pipa (m)
- f = Koefisien gesek
- g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- L = Panjang pipa (m)
- V = Kecepatan fluida (m/s)
- D = Diameter dalam pipa (m)

f) Persamaan head losses minor adalah:

$$hm = Kl \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

- hm = Kerugian minor dalam pipa (m)
- Kl = Koefisien kerugian
- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- V = Kecepatan fluida (m/s)

g) Kekasaran Relatif:

$$\frac{\text{kekasaran absolut pipa}(\epsilon)}{\text{diameter dalam pipa}(D)} \dots\dots\dots(8)$$

h) Persamaan Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

- Re = Reynold Number
- f = friction factor

3. Daya dan Efisiensi

Pompa sentrifugal menggunakan dua jenis daya saat bekerja: daya yang menggerakkan fluida (daya hidrolik) dan daya yang masuk melalui poros. Daya hidrolik adalah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan fluida, dan besarnya dapat dihitung dengan rumus tertentu.

a) Daya Pompa

Daya pada Pompa merupakan daya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa. Daya yang terdapat pada pompa, antara lain:

$$P_w = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ρ = Massa Jenis Cairan, kg/m³
- Q = Kapasitas yang Dipompakan, m³/s
- H = Head total pompa (m)
- P_w = Daya Hidrolik Pompa (kW)

b) Daya Motor

Persamaan daya motor adalah:

$$Nd = V \cdot I \cdot \cos\theta \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan :

- V = Voltase atau tegangan listrik (Volt)
- I = Kuat arus listrik (Ampere)
- $\cos \theta = 0,8$

c) Efisiensi Pompa

Efisiensi pompa adalah suatu pernyataan terkait unjuk kerja atau performa dari pompa dengan satuan persen (%) yang merupakan perbandingan energi yang berasal dari air (daya air) terhadap energi yang berasal dari motor pompa atau penggerak pompa (daya motor).

Persamaan efisiensi pompa adalah:

$$\eta_{op} = \frac{P_w}{N_d} 100\% \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan:

- η_{op} = Efisiensi Pompa (%)
- P_w = Daya Cairan (kW)
- N_d = Daya Penggerak (kW)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Spesifikasi Sistem Pemompaan

Setelah dilakukan observasi terhadap pompa P100/5 di kilang PT.X, diperoleh data tentang spesifikasi pabrikan dari pompa yang digunakan serta kondisi operasional di lapangan sebagai berikut:

- Merk : Ebara Pump
- Serial Nomor : R073130601
- Model : 50X40IFWM
- Bearing Nomor : 6308
- Capacity : 25 m³/h
- Head : 87 m
- Speed : 2930 min⁻¹
- Date : 2007.10
- Manufacture : Ebara Corporation

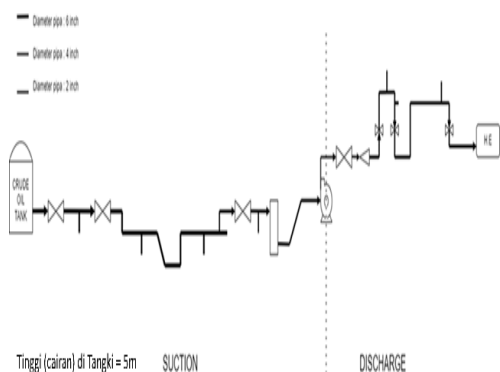
Spesifikasi motor penggerak

- Merk : Toshiba 3 Phase Induction Motor For Explosive Gas Atmosphere
- Manufacture : Toshiba Japan
- Type : TIKK
- Serial : 70180898
- Locked Rotor Current : 1,66 A
- Rated Output : 15 kw 2 poles
- Rated Voltage : 380 v
- Rated Freq : 50 hz
- Rated Current : 29,0 A
- Rated Speed : 2930 min⁻¹

Data operasi fluida

- Jenis Fluida : Crude Oil
- Pressure Discharge : 7 Kg/cm²
- Massa Jenis Fluida : 824 kg/m³
- Viskositas Kinematik (ν) : 2,376×10⁻⁶ m²/s
- Capacity : 11,8 m³/h

Data Sistem Perpipaan



Gambar 1. Skema Sistem Perpipaan Pompa P.100

Tabel 1 Data Perpipaan Pada Suction Line

Data Pipa Suction			
Deskripsi	Nilai	Satuan	
Panjang Pipa 6 inch	91	m	
Panjang Pipa 4 inch	3	m	
Pressure suction	1	atm	
Fitting	Flange	0	pcs
Pipa 4 inch	Elbow 90	1	pcs
	Elbow 45	2	pcs
	Gate Valve	1	pcs
	Strainer	0	pcs
	Reducer	1	pcs
	Tee (Fluida Belok)	1	pcs
	Tee (Fluida Lurus)	1	pcs
Fitting	Flange	6	pcs
Pipa 6 inch	Elbow 90	4	pcs
	Elbow 45	2	pcs
	Gate Valve	3	pcs
	Strainer	2	pcs
	Reducer	0	pcs
	Tee (Fluida Belok)	1	pcs
	Tee (Fluida Lurus)	4	pcs
Beda Elevasi (Zs)	5	m	

Tabel 2 Data Perpipaan Pada Discharge Line

Data Pipa Discharge			
Deskripsi	Nilai	Satuan	
Panjang Pipa 2 inch atau 0,0508 m	1,5	m	
Panjang Pipa 4 inch atau 0,1016 m	16,7	m	
Pressure Discharge	7	Kg/cm ²	
Fitting	Flange	1	pcs
Pipa 2 inch	Elbow 90	1	pcs
	Globe Valve	0	pcs
	Gate Valve	1	pcs
	Reducer	1	pcs
	Expansion Joint	0	pcs
	Tee (Fluida Belok)	0	pcs
	Tee (Fluida Lurus)	0	pcs
Fitting	Flange	6	pcs
Pipa 4 inch	Elbow 90	10	pcs
	Globe Valve	2	pcs

Gate Valve	2	pcs
Reducer	2	pcs
Expansion Joint	1	pcs
Tee (Fluida Belok)	1	pcs
Tee (Fluida Lurus)	2	pcs
Beda Elevasi (Zd)	0,8	m

Analisa Perhitungan

A. Kecepatan Aliran

1) Kecepatan Aliran pada Pipa 6 in Suction (vsa)

$$vsa = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (13)$$

$$vsa = \frac{0,003278 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \times (0,0762\text{m})^2}$$

$$vsa = \mathbf{0,1797 \text{ m/s}}$$

2) Kecepatan Aliran pada Pipa 4 in Suction (vsb)

$$vsb = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (14)$$

$$vsb = \frac{0,003278 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \times (0,0508\text{m})^2}$$

$$vsb = \mathbf{0,4044 \text{ m/s.}}$$

3) Kecepatan Aliran pada Pipa 2 in Discharge (Vda)

$$vda = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (15)$$

$$vda = \frac{0,003278 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \times (0,0254)^2}$$

$$vda = \mathbf{1,617 \text{ m/s}}$$

4) Kecepatan Aliran pada Pipa 4 in Discharge (vdb)

$$vdb = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (16)$$

$$vdb = \frac{0,003278 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \times (0,0508)^2}$$

$$vdb = \mathbf{0,4044 \text{ m/s}}$$

B. Head Kerugian

1) Head Loss Mayor Suction Pipe 6 Inch

$$Re = v \frac{D}{\nu} \dots \dots \dots (17)$$

$$Re = \frac{0,1797\text{m/s} \times 0,1524\text{m}}{2,376 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 11.520$$

Karena $Re = \mathbf{11.520} > 4.000$, aliran bersifat **turbulen**

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00026}{0,1524 \text{ m}} = 0,00170 \dots \dots \dots (18)$$

Setelah mendapatkan nilai dari Relative roughnes sebesar 0,00170 maka selanjutnya

menggunakan Persamaan Colebrook-White untuk mengetahui nilai friction factors

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0,00170}{3,7} + \frac{2,51}{11.520\sqrt{f}} \right)$$

$$f \approx 0,7194$$

Setelah mendapatkan nilai friction factor maka selanjutnya masukkan ke dalam persamaan kerugian mayor.

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots(20)$$

$$hf = 0,7194 \frac{91 \text{ m} \cdot (0,1797 \text{ m/s})^2}{0,1524 \text{ m} \cdot 2g}$$

$$hf = 0,707 \text{ m}$$

Maka hasil Kerugian mayor dalam pipa Suction Line diameter 6 inch adalah **0,707 meter**.

2) Head Loss Mayor Suction Pipe 4 Inch

$$Re = v \frac{D}{\nu} \dots\dots\dots(21)$$

$$Re = \frac{0,4044 \text{ m/s} \cdot 0,1016 \text{ m}}{2,376 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 17.294$$

Karena $Re = 17.294 > 4.000$, aliran bersifat **turbulen**

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00026}{0,1016 \text{ m}} = 0,002559 \dots\dots\dots(22)$$

Setelah mendapatkan nilai dari Relative roughnes sebesar 0,002559 maka selanjutnya menggunakan Persamaan Colebrook-White untuk mengetahui nilai friction factors

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(23)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0,002559}{3,7} + \frac{2,51}{17.294\sqrt{f}} \right)$$

$$f \approx 0,5187$$

Setelah mendapatkan nilai friction factor maka selanjutnya masukkan ke dalam persamaan kerugian mayor

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots(24)$$

$$hf = 0,5187 \cdot \frac{3 \text{ m} \cdot (0,4044 \text{ m/s})^2}{0,1016 \text{ m} \cdot 2g}$$

$$hf = 0,128 \text{ m}$$

Maka hasil Kerugian mayor dalam pipa Suction Line diameter 4 inch adalah 0,128 meter.

3) Head Loss Mayor Discharge pipe 2inch

$$Re = v \frac{D}{\nu} \dots\dots\dots(25)$$

$$Re = \frac{1,617 \text{ m/s} \cdot 0,0508}{2,376 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 34.572$$

Karena $Re = 34.572 > 4.000$, aliran bersifat **turbulen**

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00026}{0,0508 \text{ m}} = 0,005118 \dots\dots\dots(26)$$

Setelah mendapatkan nilai dari Relative roughnes sebesar 0,005118 maka selanjutnya menggunakan Persamaan Colebrook-White untuk mengetahui nilai friction factors

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(27)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0,005118}{3,7} + \frac{2,51}{34,572\sqrt{f}} \right)$$

$$f \approx 0,0331.$$

Setelah mendapatkan nilai friction factor maka selanjutnya masukkan ke dalam persamaan kerugian mayor

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots(28)$$

$$hf = 0,0331 \cdot \frac{1,5 \text{ m} \cdot (1.617 \text{ m/s})^2}{0,0508 \text{ m} \cdot 2g}$$

$$hf = 0,1303$$

Maka hasil Kerugian mayor dalam pipa Discharge Line diameter 2 inch adalah 0,1303 meter.

4) Head Loss Mayor Discharge Pipe 4 inch

$$Re = v \frac{D}{\nu} \dots\dots\dots(29)$$

$$Re = \frac{0,4044 \text{ m/s} \cdot 0,1016 \text{ m}}{2,376 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 17.293$$

Karena $Re = 17.293 > 4.000$, aliran bersifat **turbulen**

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00026}{0,1016 \text{ m}} = 0,002559 \dots\dots\dots(30)$$

Setelah mendapatkan nilai dari Relative roughnes sebesar 0,002559 maka selanjutnya menggunakan Persamaan Colebrook-White untuk mengetahui nilai friction factors

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(31)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0,002559}{3,7} + \frac{2,51}{17.293\sqrt{f}} \right)$$

$f \approx 0,0314$

Setelah mendapatkan nilai friction factor maka selanjutnya masukkan ke dalam persamaan kerugian mayor

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots(32)$$

$$hf = 0,0314 \cdot \frac{16,7 \text{ m} \cdot (0,4044 \text{ m/s})^2}{0,1016 \text{ m} \cdot 2g}$$

$hf = 0,0430 \text{ m}$

Maka hasil Kerugian mayor dalam pipa Discharge Line diameter 4 inch adalah 0,0430 meter.

5) Head Losses Minor Pada Suction Pipe 6 inch
Tabel 3 Total Kerugian Pada (Suction Pipe) 6 inch

Komponen	Jumlah	Faktor Kerugian Hambatan	Total
Flange	6	0,05	0,3
Elbow 90	4	0,45	1,8
Elbow 45	2	0,24	0,48
Gate Valve	3	0,12	0,36
Strainer	2	2	4
Reducer	-	-	0
Tee (Lurus)	1	0,3	0,3
Tee (Belok)	4	0,9	3,6
Total Kl			10,84

$$hm = Kl \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(33)$$

$$hm = 10,84 \cdot \frac{(0,1797 \text{ m/s})^2}{2g}$$

$hm = 0,01784 \text{ m}$

6) Head Losses Minor Pada Suction Pipe 4 Inch
Tabel 3 Total Kerugian Pada (Suction Pipe) 6 inch

Komponen	Jumlah	Faktor Kerugian Hambatan	Total
Flange	-	0,05	0
Elbow 90	1	0,51	0,51
Elbow 45	2	0,27	0,54
Gate Valve	1	0,14	0,14
Strainer	-	-	0
Reducer	1	0,31	0,31
Tee (Lurus)	1	0,34	0,34
Tee (Belok)	1	1,02	1,02
Total Kl			2,86

$$hm = Kl \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(34)$$

$$hm = 2,86 \cdot \frac{(0,4044 \text{ m/s})^2}{2g}$$

$hm = 0,0238 \text{ m}$

7) Head Losses Minor Pada Discharge Pipe 2 Inch
Tabel 1 Tabel Total Kerugian Pada (Discharge Pipe) 2 inch

Komponen	Jumlah	Faktor Kerugian Hambatan	Total
Flange	1	0,05	0,05
Elbow 90	1	0,57	0,57
Globe	-	6,5	0
Valve			
Gate Valve	1	0,15	0,15
Reducer	1	0,31	0,31
Expansion	-	-	0
Joint			
Tee (Belok)	-	1,14	0
Tee (Lurus)	-	0,38	0
Total Kl			1,08

$$hm = Kl \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(35)$$

$$hm = 1,08 \cdot \frac{(1,617 \text{ m/s})^2}{2g}$$

$hm = 0,144 \text{ m}$

8) Pada Discharge Pipe 4 inch
Tabel 2 Tabel Total Kerugian Pada (Discharge Pipe) 4 inch

Komponen	Jumlah	Faktor Kerugian Hambatan	Total
Flange	6	0,05	0,3
Elbow 90	10	0,51	5,1
Globe Valve	2	5,8	11,6
Gate Valve	2	0,14	0,28
Reducer	2	0,31	0,62
Tee (Belok)	1	1,02	1,02
Tee (Lurus)	2	0,34	0,68
Total Kl			19,6

$$hm = Kl \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(36)$$

$$hm = 19,6 \cdot \frac{(0,4044 \text{ m/s})^2}{2g}$$

$hm = 0,163 \text{ m}$

C. Head Total

1. Head loss pada pipa

$$hl = hf + hm \dots\dots\dots(37)$$

$$hf \text{ Suction Pipe} = 0,707 \text{ m} + 0,128 \text{ m} = 0,835 \text{ m}$$

$$hf \text{ Discharge pipe} = 0,1303 \text{ m} + 0,0430 \text{ m} = 0,1733 \text{ m}$$

$$hm \text{ Suctionn Pipe} = 0,01784 \text{ m} + 0,0238 \text{ m} = 0,04164 \text{ m}$$

$$hm \text{ Discharge Pipe} = 0,144 \text{ m} + 0,163 \text{ m} \\ = 0,307 \text{ m}$$

$$hl = 0,835 \text{ m} + 0,1733 \text{ m} + 0,04164 \text{ m} \\ + 0,307 \text{ m}$$

$$hl = 1,357 \text{ meter}$$

2. Head loss ketinggian
 $H_s = Z_d - Z_s \dots\dots\dots(38)$

$$H_s = 0,8 \text{ m} - 5 \text{ m} = -4,2 \text{ m}$$

3. Head loss tekanan
 $H_p = \frac{P_d - P_s}{\rho g} \dots\dots\dots(39)$

$$H_p = \frac{7 \text{ kg/cm}^2 - 1,03323 \text{ kg/cm}^2}{\frac{824 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot g}$$

$$H_p = 73,16 \text{ meter}$$

4. Head total pompa
 $H_{total} = H_s + H_p + H_l + H_v \dots\dots\dots(40)$

$$H_{total} = (-4,2 \text{ m}) + 73,16 \text{ m} + 1,357 \text{ m} \\ + H_v$$

Rata Rata H_v

$$V_{davg} = \frac{v_{da}}{v_{db}} \dots\dots\dots(41)$$

$$V_{davg} = \frac{3,15 \text{ m/s} + 0,788 \text{ m/s}}{2} \\ = 1,969 \text{ m/s}$$

$$V_{savg} = \frac{v_{sa}}{v_{sb}} \dots\dots\dots(42)$$

$$V_{savg} = \frac{0,351 \text{ m/s} + 0,788 \text{ m/s}}{2} \\ = 0,5695 \text{ m/s}$$

$$\text{Head Total} = (-4,2 \text{ m}) + 73,16 \text{ m} \\ + +1,357 \text{ m} \\ + \frac{\left(\frac{1,969 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(\frac{0,5695 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)} \\ = 70,5 \text{ m}$$

Jadi, nilai Head total adalah **70,5 meter**.

D. Daya dan Efisiensi

1. Daya Output Pompa

$$P_w = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \dots\dots\dots(43)$$

$$P_w = \frac{\left(\frac{824 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right) (11,8 \text{ m}^3/\text{h}) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) (70,5 \text{ m})}{1000}$$

$$WHP = 1,867 \text{ kW}$$

Daya yang dihasilkan oleh pompa adalah
 $1,867 \text{ W} = 1867 \text{ Watt}$.

2. Daya Poros Motor
 $N_d = V \times I \times \cos \theta \dots\dots\dots(44)$

$$N_d = 380 \times 15 \times 0,8$$

$$N_d = 4560 \text{ Watt}$$

Daya yang dimiliki oleh motor adalah 4560 Watt.

3. Efisiensi
 $\eta_{op} = \frac{P_w}{N_d} 100\% \dots\dots\dots(45)$

$$\eta_{op} = \frac{1867 \text{ w}}{4560 \text{ w}} 100\%$$

$$\eta_{op} = 40,94\%$$

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh bahwa efisiensi pompa sentrifugal tipe P.100/5 sebesar **40,94 %**.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil evaluasi perhitungan pompa sentrifugal P.100/5 (Ebara Corporation, 2007) dengan kapasitas 25 m³/h dan daya motor 15 kW memiliki efisiensi operasional sebesar 40,94%. Pompa tersebut masih dikategorikan layak beroperasi karena nilai efisiensi berada di atas batas minimum, yakni 10–25%. Namun demikian, nilai efisiensi tersebut tergolong rendah jika dibandingkan dengan efisiensi optimal pompa sentrifugal pada kondisi desainnya.

Penurunan efisiensi pompa tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, baik dari aspek operasional maupun desain sistem pemompaan itu sendiri. Salah satu faktor operasional adalah kurangnya pasokan *crude oil* yang diolah dari PT. Y sehingga kilang hanya mengolah 1/3 dari kapasitas terpasang. Kondisi ini menyebabkan pompa bekerja pada kondisi *oversize*, yaitu kapasitas pompa lebih besar dari kebutuhan aktual sistem. Dengan demikian, pompa akan bekerja dengan valve tertutup sebagian (*throttle*). Pengaruh bukaan valve terhadap nilai efisiensi pompa telah diteliti oleh *Putro et al.* (2020) yang menunjukkan peningkatan head loss pada 1/3 bukaan valve dibandingkan dengan 2/3 bukaan atau *full* bukaan valve sehingga menyebabkan efisiensi pompa menurun [7]. Selain itu, kondisi operasi yang dapat memengaruhi efisiensi pompa antara lain keausan ring dan *impeller clearance*, jaringan *bypass*, internal pompa yang terkorosi, pelumasan berlebih, *misalignment*,

imbalance, bengkok pada shaft, kavitasi, getaran harmonik, dan ekspansi termal pada komponen dalam aplikasi suhu tinggi [8]. Dampak dari rendahnya efisiensi pompa menyebabkan biaya operasional naik, kerusakan pada komponen menjadi lebih cepat, dan frekuensi perawatan dan *downtime* meningkat.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi pompa dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, seperti penyesuaian spesifikasi pompa dengan kebutuhan aktual pasokan dengan menurunkan spesifikasi pompa yang ada mendekati *Best Efficiency Point (BEP)*, optimalisasi aliran *crude oil*, pemeliharaan rutin, penggantian motor listrik yang memiliki daya sesuai dan efisiensi tinggi, dan pengurangan fenomena kavitasi [9][10]. Selain itu, memodifikasi parameter desain pompa seperti jumlah bilah, geometri bilah, bentuk dan ukuran casing, kecepatan putar impeller dan laju alir pompa dapat memengaruhi efisiensi pompa [11]. Penelitian *Deshmukh et al.* (2020) berhasil meningkatkan efisiensi pompa sebesar 2–9% dengan pemberian lapisan coating pada casing pompa untuk mengurangi losses [12]. Penelitian oleh Sarifudin & Irfa (2021) dapat meningkatkan efisiensi pompa dengan memperkecil jarak celah bilah pada impeller [13]. Alternatif lain dapat dilakukan dengan mengurangi tinggi isap (*suction head*), serta penggunaan konfigurasi pompa paralel untuk meningkatkan fleksibilitas operasi [14][15].

Meskipun demikian, tidak semua alternatif tersebut dapat diterapkan pada kondisi eksisting di kilang PT. X. Modifikasi desain internal pompa seperti perubahan geometri impeller, coating casing dan modifikasi jumlah bilah memerlukan biaya tinggi dan berisiko terhadap keandalan operasi. Pergantian pompa dengan kapasitas lebih kecil (*downsizing*) membutuhkan investasi awal yang besar dan kurang fleksibel jika suatu saat terjadi lonjakan pasokan minyak mentah di masa yang akan datang.

Berdasarkan hasil analisis teknis, operasional dan ekonomi, solusi paling efektif adalah memodifikasi sistem operasi melalui pemasangan *Variabel Frequency Drive (VFD)*. Penggunaan VFD memungkinkan untuk mengatur kecepatan putaran pompa agar sesuai dengan kebutuhan aktual dan dapat meningkatkan efisiensi energi [16]. Secara prinsip, penurunan kecepatan putar akan menurunkan debit dan head sesuai dengan hukum afinitas pompa, sehingga titik operasi dapat didekatkan ke kondisi BEP dan losses akibat *head loss* pada valve dapat diatasi. Penggunaan konsumsi energi juga dapat direduksi hingga 67% dengan menggunakan VFD [17].

KESIMPULAN

Pompa sentrifugal P.100/5 memiliki efisiensi operasional sebesar 40,94% dan masih dikategorikan layak beroperasi. Akan tetapi, kinerjanya belum optimal karena kebutuhan aktual sistem lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas desain pompa, sehingga pompa beroperasi dalam kondisi *oversize*. Kondisi ini menyebabkan pengaturan debit dilakukan melalui metode *throttling*, yang berdampak pada peningkatan *head loss* dan penurunan efisiensi.

Penggunaan *Variable Frequency Drive (VFD)* merupakan solusi paling efektif untuk meningkatkan efisiensi sistem, karena memungkinkan penyesuaian kecepatan putar pompa terhadap kebutuhan aktual. Dengan demikian, titik operasi pompa dapat didekatkan ke kondisi *Best Efficiency Point (BEP)*, sehingga efisiensi meningkat dan kerugian energi dapat diminimalkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Kaya, F. Çanka Kılıç, and H. H. Öztürk, "Energy efficiency in pumps," in *Energy Management and Energy Efficiency in Industry: Practical Examples*, Springer, 2021, pp. 329–374.
- [2] E. P. Putro, E. Widodo, A. Fahrudin, and I. Iswanto, "Analisis Head Pompa Sentrifugal Pada Rangkaian Seri Dan Paralel," *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 46–56, 2020, doi: 10.23917/mesin.v21i2.10671.
- [3] E. P. Putro, E. Widodo, A. Fahrudin, and I. Iswanto, "Analisis Head Pompa Sentrifugal Pada Rangkaian Seri Dan Paralel," *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 46–56, 2020.
- [4] E. Soesanto, A. Raihan, and S. Angga, "Pengaruh Kebijakan Pemerintah terhadap Keberlanjutan Industri Migas di Era Transisi Energi," pp. 15–24, 2025, doi: 10.61132/konstruksi.v3i1.680.
- [5] Ipieca, "Energy efficiency compendium," *The International Association of Oil & Gas Producers (IOGP)*, London, 2022.
- [6] L. Chen, L. Wei, Y. Wang, J. Wang, and W. Li, "Monitoring and Predictive Maintenance of Centrifugal Pumps Based on Smart Sensors,"

- Sensors, vol. 22, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22062106.
- [7] M. A. Rasyid *et al.*, “Analisis Pengaruh Tinggi Hisap Pompa Sentrifugal Terhadap Kapasitas Dan Efisiensi Pompa,” *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, vol. 7, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.31289/jmemme.v7i2.6189.
- [8] M. Sadek, R. El-Maghraby, and M. Fathy, “Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: Case study,” *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 29, no. 2, pp. 111–118, 2023, doi: 10.2298/CICEQ220318018S.
- [9] M. Sarifuddin and M. A. Irfaâ, “Pengaruh Jarak Celah Bilah Penganggu Terhadap Kinerja Pompa Sentrifugal 3 Sudu,” *Reaktom: Rekayasa Keteknikan dan Optimasi*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [10] N. Paramita and A. Ayende, “EVALUASI KINERJA POMPA SENTRIFUGAL FEED CRUDE OIL P. 100/04 DI KILANG PPSDM MIGAS CEPU,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, 2024, pp. 604–612.
- [11] P. A. Deshmukh, K. D. Deshmukh, and N. A. Mandhare, “Performance enhancement of centrifugal pump by minimizing casing losses using coating,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, pp. 1–10, 2020.
- [12] R. Subagyo and B. R. Hendratno, “Analisa Performance Pompa Sentrifugal Di Unit 2 PT. Pupuk Kalimantan Timur,” *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 30–38, 2021.
- [13] S. Lubis, I. Siregar, and A. M. Siregar, “Karakteristik Unjuk Kerja 2 Pompa Sentrifugal Dengan Susunan Seri Sebagai Turbin Pat,” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 3, no. 2, pp. 85–92, Sep. 2020, doi: 10.30596/rmme.v3i2.5270.
- [14] S. Suryadi and M. Habibi, “Analisa Pengaruh Putaran Pompa Centrifugal (Seri dan Paralel) Terhadap Aliran Fluida dan Efisiensi Pompa,” *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 34–39, 2022.
- [15] S. U. Handayani, “Karakteristik Pompa Sentrifugal Aliran Campur Dengan Variable Frequency Drive,” *ROTASI*, vol. 15, no. 3, pp. 30–34, 2013.
- [16] S. Winarto, “Optimalisasi Energi pada Pompa Kali Solo I,” *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, vol. 9, no. 1, pp. 58–72, 2019.
- [17] Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, and Dr. Mr. Satyajee Deshmukh, “Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump - A Review,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, pp. 49–58, Nov. 2021, doi: 10.32628/IJSRST218573.

RANCANG BANGUN DAN ANALISIS REGULATOR KONVENSIONAL DENGAN REGULATOR IC PADA TOYOTA KIJANG TIPE KF 40

Arifa Rizal Raspati¹

¹ Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 4015

arifarr21@upi.edu

ABSTRAK

Sistem pengisian pada kendaraan tua seperti Toyota Kijang KF 40 umumnya masih menggunakan regulator tipe kontak poin yang bersifat mekanis dan rentan terhadap kegagalan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan rancang bangun sistem pengisian dari tipe kontak poin ke tipe regulator *Integrated Circuit* (IC) pada *Car Training Stand* KF 40, serta menganalisis perbandingan performanya pada kondisi beban tetap. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan desain *before-after*. Pengujian awal pada sistem regulator kontak poin menunjukkan kegagalan fungsi total dengan tegangan output stagnan pada 12,16 V – 12,30 V, yang mengindikasikan kondisi *discharging*. Setelah dilakukan rancang bangun, hasil pengujian menunjukkan pemulihan kinerja dengan tegangan output stabil pada rentang 14,05 V – 14,21 V di seluruh variasi putaran *engine* (1200-3500 RPM). Penelitian ini membuktikan bahwa rancang bangun ke regulator IC berhasil meningkatkan stabilitas tegangan dan keandalan sistem pengisian secara optimal.

Kata kunci : sistem pengisian, kijang KF 40, regulator kontak poin, regulator IC, rancang bangun.

Abstract

The charging system in older vehicles such as the Toyota Kijang KF 40 generally still uses a mechanical contact point type regulator and is prone to failure. This study aims to design a charging system from the contact point type to the Integrated Circuit (IC) type regulator on the Car Training Stand KF 40, as well as to analyze the performance comparison under constant load conditions. The method used is a quantitative experiment with a before-after design. Initial testing on the contact point regulator system showed a total failure with a stagnant output voltage at 12.16 V – 12.30 V, which indicates a discharging condition. After the design was carried out, the test results showed a recovery in performance with a stable output voltage in the range of 14.05 V – 14.21 V across all engine speed variations (1200-3500 RPM). This study proves that the design to the IC regulator successfully improves voltage stability and reliability of the charging system optimally.

Key words : charging system, kijang KF 40, contact-point regulator, IC regulator, design and build.

PENDAHULUAN

Mesin Sistem pengisian (*charging system*) memegang peran vital dalam operasional kendaraan modern. Fungsi utamanya adalah mengisi ulang daya baterai (aki) dan menyuplai kebutuhan energi listrik ke seluruh komponen elektronik kendaraan saat *engine* beroperasi. Performa sistem pengisian yang optimal krusial untuk mencegah kegagalan suplai daya, kerusakan baterai, dan ketidakstabilan sistem elektronik lainnya [1]. Hal tersebut sejalan dengan prinsip sistem pengisian yang harus mampu

mengompensasi beban kelistrikan secara terus menerus guna menjaga siklus hidup baterai. Konteks pendidikan vokasi otomotif, pemahaman mendalam mengenai sistem ini dijumpai melalui penggunaan media pembelajaran praktis seperti *Car Training Stand*. Alat peraga, seperti *Car Training Stand KF 40*, dirancang untuk mensimulasikan lingkungan kerja sistem kelistrikan dan *engine* secara nyata, memungkinkan observasi dan diagnosis dalam kondisi laboratorium yang terkontrol.

Permasalahan teridentifikasi pada *Car Training Stand* KF 40 yang masih menggunakan regulator tipe kontak poin. Teknologi ini memiliki

kelemahan pada stabilitas tegangan akibat ketergantungan pada kontak platina yang rentan aus. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini berfokus pada rancang bangun sistem pengisian menggunakan teknologi IC regulator untuk meningkatkan presisi regulasi tegangan. Teknologi ini memiliki sejumlah kelemahan, seperti stabilitas tegangan yang rendah akibat ketergantungan pada kontak platina mekanis yang rentan terhadap keausan dan perubahan celah yang mengakibatkan tegangan *output* menjadi tidak stabil [2]. Selain itu, titik kontak rentan mengalami keausan dan oksidasi, sehingga menuntut perawatan intensif. Responnya dalam menyesuaikan arus medan magnet juga cenderung lebih lambat dibandingkan sistem elektronik [3].

Penggunaan teknologi regulator kontak poin yang sudah usang pada media pembelajaran ini menciptakan kesenjangan kompetensi. Saat ini, industri otomotif telah sepenuhnya beralih ke alternator modern yang dilengkapi *Integrated Circuit* (IC) Regulator. Regulator IC menawarkan keunggulan mutlak dalam hal stabilitas tegangan yang presisi, keandalan tinggi (bebas perawatan), dan respon yang cepat terhadap perubahan beban [4].

Berdasarkan kesenjangan teknologi dan kebutuhan pembaruan media pembelajaran tersebut, penelitian ini berfokus pada rancang bangun dan analisis penggantian alternator regulator konvensional dengan regulator IC pada sistem pengisian *Car Training Stand KF 40*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah melakukan rancang bangun penggantian alternator tersebut, yang dilanjutkan dengan menganalisis dan membandingkan performa sistem pengisian secara kuantitatif. Analisis ini difokuskan untuk mengetahui keunggulan performa regulator IC dibandingkan regulator kontak poin, khususnya dalam merespon variasi putaran *engine* (RPM) dalam kondisi tanpa beban kelistrikan karena objek toyota KF 40 ini sudah dirubah menjadi *car training stand* dimana *car training stand* ini dibuat tanpa beban kelistrikan interior (seperti AC, *wiper*, *power window*, dll dan hanya berupa rangka terbuka, kursi, dan *engine*).

Permasalahan teridentifikasi pada *Car Training Stand KF 40* yang masih menggunakan regulator tipe kontak poin. Teknologi ini memiliki kelemahan pada stabilitas tegangan akibat ketergantungan pada kontak platina yang rentan aus. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini berfokus pada rancang bangun sistem pengisian menggunakan teknologi IC regulator untuk meningkatkan presisi regulasi tegangan. Rancang bangun ini sekaligus difokuskan untuk memastikan tingkat kelayakan media agar siap dan andal digunakan sebagai sarana pembelajaran di sekolah, sejalan dengan terbuktinya efektivitas pembaruan

simulator pengisian IC regulator dalam mendukung pemahaman kompetensi teknis siswa [9].

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berlapis. Secara praktis, penelitian ini menghasilkan media pembelajaran (*training stand*) yang telah diperbarui (*up-to-date*) sehingga lebih relevan dengan teknologi otomotif terkini di industri [5]. Secara akademis, penelitian ini menyumbangkan data kuantitatif komparatif yang jelas mengenai karakteristik dan performa antara sistem pengisian konvensional dan modern. Pada akhirnya, secara pedagogis, pembaruan alat dan ketersediaan data ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman serta kompetensi mahasiswa atau siswa mengenai prinsip kerja, diagnosis, dan keunggulan teknologi sistem pengisian modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental dengan pendekatan Rancang Bangun. Desain penelitian difokuskan pada perbandingan performa *pre-test* dan *post-test*, yaitu dengan membandingkan data performa sistem pengisian sebelum rancang bangun (kondisi *baseline* menggunakan regulator kontak poin) dan sesudah rancang bangun (menggunakan alternator ber-regulator IC). Penelitian dilaksanakan pada bulan September-Oktober tahun 2025 di *Workshop Otomotif Universitas Pendidikan Indonesia*, dengan objek penelitian berupa satu unit *Car Training Stand KF 40*.

Bahan utama yang digunakan meliputi unit training stand itu sendiri, satu unit alternator konvensional (regulator kontak poin) sebagai data *baseline*, satu unit alternator *modern* (regulator IC) sebagai perangkat rancang bangun, dan satu unit baterai 12V. Peralatan rancang bangun yang digunakan mencakup set kunci bengkel (pas/ring/soket), obeng, dan tang. Prosedur rancang bangun dan pengujian mengacu pada standar operasional prosedur (SOP) sistem kelistrikan otomotif [1]. Proses pengujian didukung oleh instrumen ukur presisi berupa *Multimeter Digital* untuk mengukur tegangan (V), Tang Ampere (*Clamp Meter*) untuk mengukur arus (A), dan *Tachometer* untuk mengukur putaran *engine* (RPM). Sesuai dengan ruang lingkup penelitian, pengujian performa dibatasi hanya pada kondisi tanpa beban.

Prosedur penelitian dilaksanakan secara sistematis dengan alur sebagai berikut:

1. Diawali dengan studi literatur untuk mengkaji diagram kelistrikan dan spesifikasi teknis kedua sistem.
2. Tahap selanjutnya adalah Pengujian Awal (Kondisi A), di mana performa sistem pengisian

konvensional (kontak poin) diuji. Pengambilan data tegangan (V) dan arus (A) dilakukan pada berbagai variasi putaran *engine* (RPM), diantaranya 1200 (*idle*), 1500, 2500, dan 3500 RPM. Seluruh pengujian pada tahap ini dilakukan hanya pada kondisi tanpa beban. Pengujian tanpa beban ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dasar alternator dalam menyuplai arus eksitasi dan pengisian baterai [6]. Fokus utama pengukuran adalah untuk memvalidasi stabilitas suplai arus eksitasi yang dibutuhkan untuk membangkitkan kemagnetan rotor, serta memastikan bahwa tegangan output yang dihasilkan mampu melampaui tegangan statis baterai untuk memicu proses pengisian dasar secara efektif.

3. Setelah data awal terkumpul, Tahap Rancang Bangun (Rancang bangun) dilaksanakan. Tahap ini meliputi pembongkaran alternator konvensional, pemasangan alternator baru (regulator IC), penyesuaian dudukan (*bracket*) jika diperlukan, dan penyesuaian ulang pengkabelan (*rewiring*) sesuai diagram regulator IC yang telah dilakukan rancang bangun menjadi lebih ringkas, guna memastikan kompatibilitas sistem [5].
4. Langkah terakhir adalah Pengujian Akhir (Kondisi B) dan analisis data, di mana sistem yang telah dirancang bangun diuji kembali. Pengambilan data tegangan dan arus dilakukan menggunakan variasi RPM yang persis sama dengan Pengujian Awal, dan juga tetap hanya pada kondisi Tanpa Beban untuk menjamin validitas komparasi data. Seluruh data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode Analisis Deskriptif Komparatif.



Gambar 1 Flowchart Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

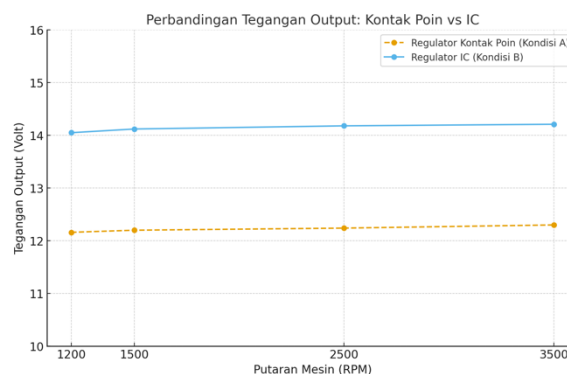
Proses penelitian rancang bangun dan analisis ini telah berhasil dilaksanakan. Tahap rancang bangun (rancang bangun) yang meliputi penggantian alternator konvensional dengan alternator ber-regulator IC pada *Car Training Stand KF 40* berjalan lancar, termasuk penyesuaian dudukan dan pengkabelan ulang. Setelah rancang bangun, dilakukan pengambilan data komparatif. Data performa sistem pengisian sebelum rancang bangun (menggunakan regulator Kontak Poin) dan sesudah rancang bangun (menggunakan regulator IC) diuji pada kondisi yang identik. Sesuai batasan penelitian, pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dengan variasi putaran *engine* (RPM).

Analisis Performa Tegangan (Voltase)

Tegangan adalah parameter utama yang dikontrol oleh regulator. Data perbandingan tegangan output kedua sistem disajikan pada Tabel 5.1 dan Gbr. 5.1.

Tabel 1 Perbandingan Tegangan Output (V) Tanpa Beban.

Putaran Engine (RPM)	Tegangan Regulator Kontak Poin (Kondisi A) (Volt)	Tegangan Regulator IC (Kondisi B) (Volt)
1200 (Idle)	12,16	14,05
1500	12,20	14,12
2500	12,24	14,18
3500	12,30	14,21



Gambar 2 Grafik Perbandingan Tegangan Output Regulator Kontak Poin dan IC

Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Gambar 1 terlihat perbedaan karakteristik yang berbeda antara kedua sistem.

Pada Kondisi A, ditemukan kegagalan fungsi dengan tegangan stagnan antara 12,16 V hingga 12,30 V. Temuan dari hasil tersebut adalah permukaan platina yang berfungsi memutus-

sambungkan arus eksitasi telah mengalami oksidasi atau keausan (*pitting*), sehingga menghambat aliran listrik ke *rotor coil*. Karena arus eksitasi terhambat, kemagnetan pada *rotor coil* menjadi sangat lemah. Akibatnya, putaran secepat apa pun dari *engine* (hingga 3500 RPM) tidak akan mampu diubah oleh *stator coil* menjadi tegangan output yang optimal.

Karena angka ini di bawah tegangan statis baterai, sistem mengalami kondisi *discharging*. *Discharging* adalah proses pengosongan muatan baterai karena beban sistem tidak mampu ditutup oleh output alternator, disebabkan oleh keausan titik kontak pada regulator konvensional. Kondisi tegangan yang tertahan di bawah angka statis baterai (12,6 V) ini mengindikasikan bahwa sistem sedang dalam kondisi *discharging*. Hal ini memvalidasi urgensi penggantian komponen, sesuai dengan landasan teori yang menyatakan bahwa regulator mekanis tua rentan mengalami kegagalan total akibat keausan titik kontak [2].

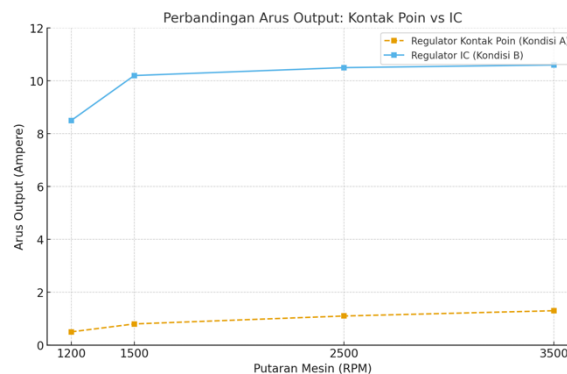
Setelah dilakukan rancang bangun (Kondisi B), sistem menunjukkan pemulihan kinerja yang cenderung berbeda. Pada putaran *idle* (1200 RPM), tegangan mencapai 14,05 V dan sangat stabil hingga 14,21 V pada 3500 RPM. Fluktuasi tegangan hanya sebesar 0,16 V, angka fluktuasi sebesar 0,16 V diperoleh secara empiris dari selisih titik tegangan tertinggi dan terendah yang dihasilkan oleh regulator IC selama pengujian pada berbagai rentang putaran *engine*. Kestabilan ini tercapai karena regulator IC menggunakan komponen semikonduktor yang merespons perubahan putaran *engine* tanpa jeda mekanis. Hal ini tervalidasi dengan penelitian Sinaga & Tarmizi [7] yang menyatakan bahwa regulator IC memiliki presisi regulasi tinggi untuk mencegah *overcharging*. Pengukuran arus pada kondisi tanpa beban bertujuan untuk melihat seberapa besar arus yang dialirkan untuk pengisian baterai.

Secara teoretis, kelemahan sistem mekanis murni terletak pada inersia pegas dan gesekan platina yang membatasi kecepatan pemutusan arus medan. Sebaliknya, regulator IC mengatasi masalah ini dengan memanfaatkan komponen transistor yang mampu melakukan *switching* (pemutusan dan penyambungan arus eksitasi) dalam waktu milidetik tanpa adanya kontak fisik mekanis. Teori dasar ini menjelaskan secara komprehensif mengapa sistem IC mampu merespons perubahan RPM dengan sangat cepat sehingga fluktuasi tegangan dapat ditekan seminimal mungkin [11].

Tabel 2 Perbandingan Arus Output (A) Tanpa Beban.

Putaran Engine (RPM)	Arus (Ampere) Regulator Kontak Poin (Kondisi A)	Arus (Ampere) Regulator IC (Kondisi B)
1200 (Idle)	0,5	8,5
1500	0,8	10,2
2500	1,1	10,5
3500	1,3	10,6

Putaran Engine (RPM)	Arus (Ampere) Regulator Kontak Poin (Kondisi A)	Arus (Ampere) Regulator IC (Kondisi B)
1200 (Idle)	0,5	8,5
1500	0,8	10,2
2500	1,1	10,5
3500	1,3	10,6



Gambar 3 Grafik Perbandingan Arus Output Regulator Kontak Poin dan IC

Data pada Tabel 2 dan Gambar 2 menunjukkan perbedaan dalam kemampuan suplai arus. Pada Kondisi A (Kontak Poin), arus yang terukur sangat kecil (0,5 A – 1,3 A). Nilai ini tidak mencukupi bahkan untuk kebutuhan dasar sistem pengapian *engine*, sehingga mengakibatkan baterai mengalami pengosongan (*discharging*) terus-menerus [11]. Pada Kondisi B, alternator mampu menyuplai arus 8,5 A – 10,6 A. Perlu dicatat bahwa arus pada Kondisi B tidak melonjak tinggi (misalnya hingga 40 A) karena pengujian dilakukan Tanpa Beban. Pada kondisi ini, Regulator IC bekerja cerdas dengan hanya menyuplai arus sesuai kebutuhan beban dasar (sistem pengapian) dan pengisian baterai, mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) yang dapat merusak baterai. Kestabilan arus pada regulator IC disebabkan oleh respon cepat transistor dalam mengatur arus *field coil* tanpa jeda mekanis, berbeda dengan regulator kontak poin yang memiliki keterbatasan pada respon pegas [8].

Pemulihan kinerja juga divalidasi oleh ketersediaan arus listrik yang sehat. Pada Kondisi B, alternator mampu menyuplai arus sebesar 8,5 A pada putaran rendah dan stabil hingga 10,6 A pada putaran tinggi. Suplai arus ini tidak hanya cukup untuk kebutuhan operasional *engine* (sistem pengapian), tetapi juga menyediakan daya cadangan untuk pengisian pemeliharaan baterai secara kontinu.

Tercapainya tegangan output yang stabil di kisaran 14,05 V – 14,21 V pada Kondisi B tidak hanya mengindikasikan pemulihan fungsional, tetapi juga berfungsi sebagai validasi teknis terhadap standar operasional sistem pengisian kendaraan ringan. Angka keluaran ini telah memenuhi parameter spesifikasi pabrikan otomotif modern. Kesesuaian dan presisi data kelistrikan ini

merupakan syarat mutlak dalam proses validasi rancang bangun media pembelajaran. Dengan teratasinya anomali kegagalan total pada sistem sebelumnya, *Car Training Stand* ini telah tervalidasi dan dinyatakan sangat layak untuk diimplementasikan sebagai media pembelajaran di sekolah. Kelayakan ini menjamin bahwa siswa atau praktikan dapat melakukan proses diagnosis pada sistem yang beroperasi secara normal tanpa terdistraksi oleh kerusakan mekanis [10].

KESIMPULAN

Dari studi diagnostik dan analisis kinerja yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan:

1. Rancang bangun dengan penggantian menggunakan alternator ber-regulator IC terbukti berhasil memulihkan kinerja pengisian. Sistem menyediakan performa tegangan yang sangat stabil (pada rentang 14,05 V – 14,21 V) dan suplai arus yang andal.
2. Rekomendasi utama dari penelitian ini adalah bahwa *upgrade* ke sistem IC merupakan keharusan untuk mengatasi kelemahan mekanis sistem konvensional. Rancang bangun ini sangat layak diaplikasikan guna menjamin keandalan operasional kelistrikan Kijang KF 40 maupun sebagai media pembelajaran standar industri otomotif.

Penggantian ini merupakan sebuah peningkatan (*upgrade*) yang sangat direkomendasikan bagi pemilik kendaraan Toyota Kijang KF40 untuk mengatasi kelemahan sistem pengisian standarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama penyusunan laporan ini begitu banyak bantuan dan dorongan dari berbagai pihak, oleh karena itu dengan kerendahan hati penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan penulis kelancaran sehingga dapat menyelesaikan pembuatan laporan ini.
2. Program Studi S1 Pendidikan Teknik Otomotif Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri Universitas Pendidikan Indonesia.
3. Semua pihak yang telah membantu dan turut mendoakan penulis sehingga kegiatan penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.

Semoga semua dukungan, bantuan dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis baik secara langsung maupun tidak langsung mendapat balasan dari Tuhan yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arifin, Z., & Setiawan, A. (2019). Perbandingan Kinerja Alternator Standar dengan Alternator Rancang bangun 80A pada Sistem Audio Mobil. *Jurnal Vokasi Teknik Otomotif*, 2(2), 78-85.
- [2] Boentarto. (2015). *Sistem Kelistrikan Otomotif*. Yogyakarta: Deepublish.
- [3] Daryanto. (2018). *Sistem Pengisian Konvensional dan Elektronik*. Jakarta: PT Bumi Aksara.
- [4] Daryanto. (2021). *Sistem Kelistrikan Kendaraan Ringan*. Jakarta: PT Bumi Aksara.
- [5] Daryanto. (2021). *Sistem Kelistrikan Kendaraan Ringan*. Jakarta: PT Bumi Aksara.
- [6] Nugroho, A., & Sudira, P. (2021). Validasi Kinerja dan Kelayakan *Car Training Stand* sebagai Media Pembelajaran Kelistrikan Otomotif. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 8(2), 112-120.
- [7] Putra, D. S., & M, N. (2024). Analisis Sistem Pengisian Regulator Tipe Kontak Poin pada Mobil Toyota Kijang 5K. *Jurnal Teknik Engine Universitas Tanjungpura (Jurnal UNTAN)*.
- [8] Sinaga, S., & Tarmizi, H. B. (2020). Analisis Perbandingan Sistem Pengisian Konvensional dan Sistem Pengisian IC Regulator pada Mobil. *Jurnal Ilmiah Teknik Engine (INVOTEK)*, 2(1).
- [9] Sinaga, S., & Tarmizi, H. B. (2020). Analisis Perbandingan Sistem Pengisian Konvensional dan Sistem Pengisian IC Regulator pada Mobil. *Jurnal Ilmiah Teknik Engine (INVOTEK)*, 2(1)..
- [10] Subeki, K., Sugiarto, T., Maksum, H., Saputra, H. D., & Wagino. (2024). Pengembangan Simulator Sistem Pengisian IC Regulator sebagai Media Pembelajaran Siswa SMK. *MSI Transaction on Education*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.46574/mted.v5i1.132>.
- [11] Wibowo, S., & Setiawan, B. (2022). *Sistem Kelistrikan Kendaraan Ringan: Teori dan Aplikasi Semikonduktor*. Bandung: Penerbit Pustaka Otomotif.

ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR ARM CHAIR PRODUKSI INDUSTRI FURNITUR MENGGUNAKAN METODE FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)

Wahyu Widiyanto¹, Agung Ari Purwanto¹, Soleh Muhamad¹, Nurmadina¹, Dhian Juwita¹

¹ Program Studi Teknik Produksi Furnitur, Politeknik Industri Furnitur dan Pengolahan Kayu

Jl. Wanamarta No. 20 KIK Kendal, 51371

wahyu.widiyanto@poltek-furnitur.ac.id¹

Abstrak

Analisis kekuatan struktural merupakan aspek penting dalam pengembangan produk furnitur, khususnya pada arm chair yang menerima pembebanan statis selama penggunaan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja struktural arm chair berbahan kayu jati menggunakan metode *finite element analysis* (FEA). Material dimodelkan secara ortotropik untuk merepresentasikan perilaku anisotropik kayu secara lebih realistis. Pembebanan mengacu pada standar EN 12520, yaitu 1300 N pada dudukan dan 450 N pada sandaran. Validasi numerik dilakukan melalui uji konvergensi mesh untuk memastikan independensi hasil terhadap ukuran elemen. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum berada pada kisaran ± 5 MPa dan terlokalisasi pada area sambungan struktur. Deformasi maksimum tercatat sebesar $\pm 1,51$ mm, sedangkan faktor keamanan minimum berada pada rentang 6,09–6,35. Seluruh parameter menunjukkan deviasi di bawah 5% pada uji konvergensi mesh, yang menandakan hasil simulasi telah stabil dan reliabel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur kursi berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan yang diberikan. Selain itu, distribusi tegangan yang relatif rendah pada sebagian besar komponen mengindikasikan adanya potensi optimasi desain untuk meningkatkan efisiensi material tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur.

Kata kunci : FEA, *arm chair*, kayu jati, analisis struktur.

Abstract

Structural strength analysis is a critical aspect in furniture product development, particularly for armchairs subjected to static loading during use. This study aims to evaluate the structural performance of a teak wood armchair using the Finite Element Analysis (FEA) method. The material was modeled as orthotropic to accurately represent the anisotropic behavior of wood. The loading conditions were defined based on the EN 12520, applying 1300 N on the seat and 450 N on the backrest. Numerical validation was conducted through mesh convergence analysis to ensure solution independence from element size. The results indicate that the maximum stress is approximately 5 MPa, primarily concentrated at the joint regions. The maximum displacement is about 1.51 mm, while the minimum safety factor ranges from 6.09 to 6.35. All parameters exhibit deviations below 5% in the mesh convergence test, confirming the stability and reliability of the simulation results. These findings demonstrate that the chair structure is structurally safe under the applied loading conditions. Moreover, the relatively low stress distribution across most components suggests potential design optimization to improve material efficiency without compromising structural safety.

Key words : FEA, *arm chair*, teak wood, structure analysis.

PENDAHULUAN

Proses Perkembangan industri furnitur menuntut produk yang tidak hanya unggul secara estetika dan ergonomi, tetapi juga memenuhi aspek kekuatan dan keamanan struktural. *Arm chair*, sebagai salah satu produk furnitur utama, menerima pembebanan kompleks terutama pada area dudukan dan sandaran tangan sehingga memerlukan evaluasi rekayasa desain yang memadai. *Arm chair* produk dari CV Riverina merupakan produk furnitur lokal

berkualitas yang diekspor ke Amerika, namun hingga saat ini belum dilakukan analisis numerik secara komprehensif terhadap kekuatan strukturalnya pada kondisi pembebanan statis. Oleh karena itu, diperlukan kajian analitis untuk mengevaluasi performa struktural kursi sebagai dasar pengembangan desain yang aman dan andal.

Evaluasi kekuatan struktural secara konvensional membutuhkan pengujian fisik yang memerlukan waktu, biaya, dan sumber daya yang besar. Sebagai alternatif, *finite element analysis* (FEA) hadir sebagai pendekatan simulatif yang

efektif dan efisien dalam menganalisis tegangan, deformasi, dan distribusi beban pada produk [1]. FEA memungkinkan identifikasi titik kritis pada struktur kursi sebelum diproduksi massal, sehingga potensi kegagalan dapat diminimalkan di tahap awal desain [2].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan FEA sangat efektif dalam mengevaluasi produk furnitur. Misalnya, Hitka dkk (2022) mengevaluasi pengaruh peningkatan massa tubuh pengguna terhadap pembebanan struktural pada elemen kursi kayu menggunakan *software* ANSYS. Model 3D yang dibangun memperhitungkan sifat ortotropik dari material kayu [3]. Demikian pula, studi oleh Rahmat et al. (2024) menegaskan pentingnya pemilihan sambungan dan konfigurasi struktur dalam mendistribusikan tegangan secara merata [4].

Penelitian ini menekankan pentingnya simulasi pembebanan untuk mengevaluasi kemampuan struktur *arm chair* dalam menahan beban pengguna serta mengidentifikasi potensi titik lemah sebelum produksi. Metode *finite element analysis* (FEA) digunakan karena telah terbukti efektif dalam berbagai penelitian sebelumnya untuk menganalisis perilaku struktural furnitur kayu, baik pada aspek distribusi tegangan, deformasi, sambungan mortise and tenon, maupun optimasi desain.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode *finite element analysis* (FEA) efektif dalam menganalisis kekuatan dan perilaku struktural furnitur. Smardzewski (2008) membuktikan bahwa jenis kayu dan modulus elastisitas perekat berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dan deformasi pada sambungan mortise and tenon [5], sementara Tankut dkk. (2014) menegaskan kemampuan FEA dalam merepresentasikan karakteristik mekanis kayu sebagai material ortotropik pada kondisi pembebanan realistik [6]. Pendekatan serupa juga diterapkan oleh Al Hakim (2020) pada kursi plastik, yang menunjukkan bahwa FEA tidak hanya berguna untuk evaluasi kekuatan, tetapi juga untuk optimasi desain dan efisiensi material [7]. Secara eksperimental, Ceylan dkk. (2021) menemukan bahwa tipe sambungan dan arah pembebanan sangat memengaruhi kekakuan dan ketahanan struktur furnitur kayu [8]. Meskipun berbagai penelitian telah menerapkan FEA untuk menganalisis struktur furnitur, sebagian besar studi berfokus pada model eksperimen laboratorium atau furnitur berbahan komposit dan plastik. Kajian yang secara khusus mengevaluasi *arm chair* berbahan kayu jati dengan konfigurasi sambungan mortise-and-tenon pada produk industri furnitur lokal masih sangat terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang menganalisis performa struktural

produk furnitur industri menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk memperoleh gambaran distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan struktur.

Kayu jati (*Tectona grandis*) banyak digunakan pada furnitur struktural karena memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, stabilitas dimensi yang baik, serta ketahanan terhadap degradasi biologis. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kayu jati memiliki nilai modulus elastisitas dan modulus patah yang tinggi, serta kekuatan tekan dan geser sejajar serat yang memadai untuk menahan beban lentur pada struktur furnitur [9]; [10]. Selain itu, stabilitas dimensional kayu jati yang baik menjadikannya material yang sesuai untuk aplikasi *arm chair* dan penting untuk dimodelkan secara akurat dalam simulasi numerik berbasis *finite element analysis*.

Sambungan mortise-and-tenon merupakan teknik konstruksi yang umum digunakan pada furnitur kayu seperti *arm chair* karena kemampuannya dalam menahan beban dan menjaga kestabilan struktur jangka panjang. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *finite element analysis* (FEA) efektif dalam memodelkan perilaku mekanis sambungan ini, termasuk pengaruh ketebalan garis lem, koefisien gesekan, dan dimensi tenon terhadap kapasitas lentur dan kekakuan sambungan. Hu dkk. (2019) dan Hu & Liu (2020) membuktikan bahwa hasil simulasi FEA memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data eksperimen, dengan rasio validitas di atas 85 %, sehingga metode ini dapat diandalkan untuk memprediksi kekuatan dan kinerja struktural sambungan mortise-and-tenon [11]; [12]. Temuan tersebut memperkuat relevansi penggunaan FEA dalam analisis sambungan kursi kayu sebagai bagian kritis dari struktur yang menerima beban lentur dan tarik selama penggunaan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktural *arm chair* berbahan kayu jati produksi industri furnitur menggunakan metode *finite element analysis* (FEA). Analisis difokuskan pada evaluasi distribusi tegangan, deformasi maksimum, serta faktor keamanan struktur kursi pada kondisi pembebanan statis yang merepresentasikan beban pengguna. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar rekayasa dalam evaluasi desain furnitur serta menjadi referensi dalam pengembangan produk kursi yang lebih aman, andal, dan efisien secara struktural.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menerapkan FEA secara konvensional, penelitian ini mengintegrasikan tiga aspek utama untuk meningkatkan kualitas analisis. Pertama, penggunaan model material ortotropik

berbasis arah serat untuk merepresentasikan perilaku anisotropik kayu jati secara lebih realistis. Kedua, penerapan validasi numerik melalui uji konvergensi mesh guna memastikan keandalan dan stabilitas hasil simulasi. Ketiga, penggunaan kondisi pembebanan yang mengacu pada standar internasional EN 12520 sehingga meningkatkan validitas pendekatan yang digunakan.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis rekayasa dengan memanfaatkan simulasi numerik menggunakan metode *finite element analysis* (FEA). Metode ini digunakan untuk mengevaluasi kekuatan struktural *arm chair* melalui analisis distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan akibat pembebanan statis. Pendekatan FEA dipilih karena mampu memprediksi perilaku mekanik struktur secara numerik sebelum dilakukan pengujian fisik. Dengan metode ini, distribusi tegangan pada setiap bagian struktur kursi dapat dianalisis secara detail sehingga area kritis yang berpotensi mengalami kegagalan dapat diidentifikasi sejak tahap desain.

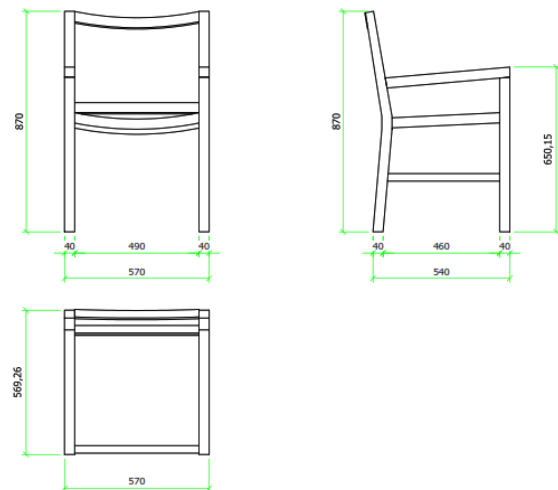
Objek Penelitian

Objek penelitian dalam studi ini adalah *arm chair* berbahan kayu jati produksi CV Riverina, yang merupakan salah satu produk furnitur yang diproduksi untuk pasar ekspor. Kursi ini memiliki struktur utama yang terdiri dari komponen dudukan, sandaran, kaki depan, kaki belakang, dan sandaran tangan.



Gambar 1 *Arm chair* [13]

Konstruksi kursi menggunakan sistem sambungan mortise and tenon yang umum digunakan pada furnitur kayu karena memiliki kekuatan mekanik yang baik dalam menahan beban lentur dan gaya tarik pada struktur kursi.



Gambar 2 Model *Arm Chair*

Model kursi direkonstruksi dalam bentuk model tiga dimensi (3D) menggunakan perangkat lunak CAD berdasarkan dimensi aktual produk untuk keperluan simulasi numerik.

Properti Material

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kayu jati (*Tectona grandis*). Dalam simulasi elemen hingga, material kayu dimodelkan dengan memasukkan parameter sifat mekanik yang meliputi:

Tabel 1. Properti Material kayu jati (*Tectona grandis*) untuk simulasi FEA [14]

Parameter	Nilai	Satuan
Density	636	kg/m ³
Young's Modulus X (Longitudinal)	11,515	Mpa
Young's Modulus Y (Radial)	1,200	Mpa
Young's Modulus Z (Tangential)	800	Mpa
Poisson's Ratio XY	0.01	-
Poisson's Ratio YZ	0.35	-
Poisson's Ratio ZX	0.02	-
Shear Modulus XY	903	Mpa
Shear Modulus YZ	3,000	Mpa
Shear Modulus ZX	703	Mpa
Bending Strength (MOR)	118	Mpa
Compression Parallel to Grain	41	Mpa
Compression Perpendicular to Grain	11.5	Mpa
Shear Parallel to Grain	8.8	Mpa
Tensile Strength (axial)	118	Mpa
Tensile Strength (perpendicular)	4.1	MPa

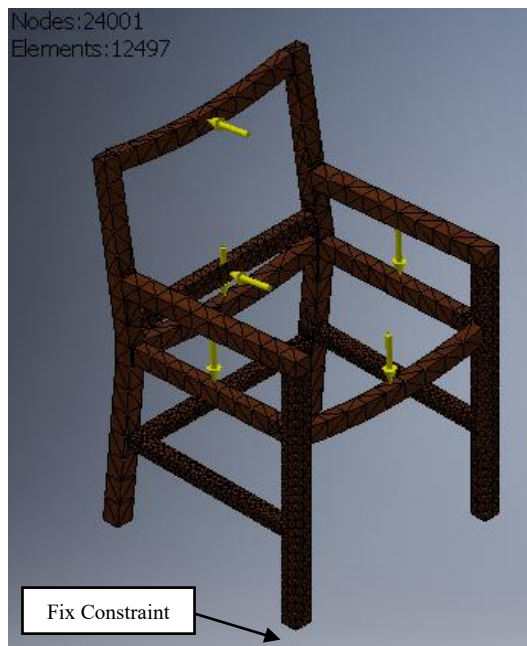
Pemodelan material ortotropik ini memungkinkan simulasi untuk menangkap perilaku mekanik kayu yang anisotropik, sehingga hasil analisis tegangan dan deformasi menjadi lebih

representatif dibandingkan dengan pendekatan material isotropik.

Variasi Pemodelan Elemen Hingga

Simulasi struktural dilakukan menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) dengan bantuan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional. Model geometri kursi dibagi menjadi elemen-elemen kecil melalui proses meshing untuk mempermudah perhitungan numerik pada struktur yang kompleks.

Uji konvergensi mesh dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada ukuran mesh yang digunakan. Variasi mesh dibuat dengan mengubah parameter average element size, sedangkan parameter lainnya seperti minimum element size, grading factor, dan maximum turn angle dijaga konstan untuk menjaga konsistensi kondisi simulasi.



Gambar 3 Pemodelan dan Mesh

Nilai tegangan maksimum diamati pada setiap variasi mesh untuk mengevaluasi kestabilan hasil. Rincian variasi mesh yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Mesh dan Jumlah Elemen

Variasi Mesh	Average Element Size	Jumlah Elemen	Jumlah Node
Mesh Kasar	0.050	12,176	23,728
Mesh Sedang	0.037	19,231	36,194
Mesh Halus	0.020	26,174	47,875

Hasil menunjukkan bahwa jumlah elemen meningkat secara signifikan seiring dengan pengecilan average element size. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat lunak melakukan penyesuaian mesh secara adaptif terhadap kompleksitas geometri model.

Evaluasi konvergensi dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan maksimum pada setiap variasi mesh. Apabila perbedaan nilai tegangan antar variasi mesh berada di bawah ambang batas 5%, maka hasil simulasi dapat dianggap telah mencapai kondisi independensi mesh (*mesh independence*).

Kondisi Batas dan Pembebanan

Untuk mensimulasikan kondisi penggunaan kursi, beberapa kondisi batas diterapkan pada model simulasi. Seperti diperlihatkan pada gambar 3, bagian kaki kursi yang bersentuhan dengan permukaan lantai diberikan kondisi *fixed constraint*, yang merepresentasikan posisi kursi saat digunakan oleh pengguna.

Pembebanan dalam penelitian ini tidak ditentukan secara asuntif, melainkan mengacu pada standar internasional EN 12520 yang mengatur persyaratan kekuatan dan ketahanan furnitur tempat duduk untuk penggunaan domestik.

Berdasarkan standar tersebut, pembebanan statis diberikan pada dua area utama, yaitu:

- Beban vertikal pada dudukan sebesar 1300 N
- Beban horizontal pada sandaran sebesar 450 N

Pembebanan ini diterapkan secara simultan untuk mensimulasikan kondisi penggunaan aktual yang lebih realistis.

Sambungan menggunakan lem (*adhesive bonding*) secara mekanis berfungsi sebagai penghubung struktural yang mampu mentransfer tegangan geser dan normal antar komponen. Dalam analisis elemen hingga (FEA), kondisi ini direpresentasikan sebagai *bonded contact*, di mana tidak terjadi pemisahan maupun pergeseran relatif antar permukaan yang terhubung. Pendekatan ini sesuai dengan karakteristik *adhesively bonded joints* yang bekerja sebagai sistem kontinu selama tidak terjadi kegagalan material [15]; [16].

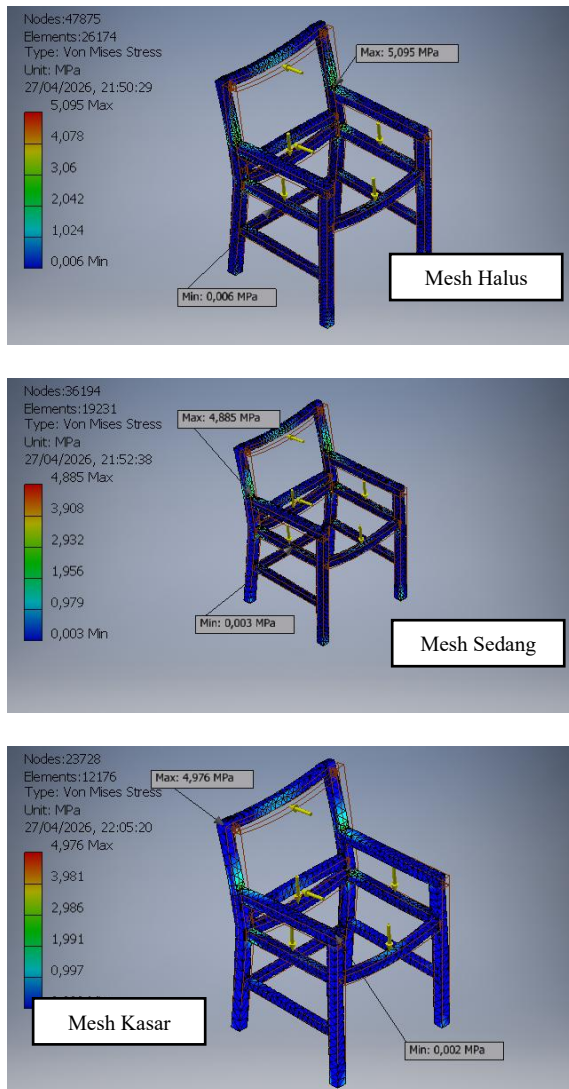
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Distribusi Tegangan dan Konvergensi Mesh

Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan pada seluruh struktur kursi akibat pembebanan statis yang mengacu pada standar EN 12520, yaitu beban sebesar 1300 N pada dudukan dan 450 N pada sandaran. Analisis tegangan

dilakukan menggunakan kriteria *von Mises stress*, yang umum digunakan dalam analisis struktural untuk mengevaluasi potensi kegagalan material akibat kombinasi tegangan multiaksial.

Untuk memastikan keandalan hasil simulasi, analisis dilakukan dengan tiga variasi tingkat mesh, yaitu mesh halus, mesh sedang, dan mesh kasar (Gambar 4). Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran elemen terhadap distribusi tegangan yang dihasilkan.



Gambar 4 Distribusi Tegangan

Berdasarkan hasil simulasi, nilai tegangan maksimum (*maximum von Mises stress*) yang terjadi pada struktur kursi berada pada kisaran ± 5 MPa. Tegangan maksimum tersebut terlokalisasi pada sambungan antara bagian sandaran badan dan sandaran lengan pada rangka kursi. Area ini merupakan komponen struktural kritis yang berfungsi sebagai jalur utama transfer beban dari permukaan dudukan menuju sandaran, sehingga

mengalami konsentrasi tegangan yang relatif lebih tinggi dibandingkan bagian struktur lainnya.

Selain itu, pola distribusi tegangan yang dihasilkan pada ketiga variasi mesh menunjukkan kecenderungan yang konsisten. Tegangan tinggi terkonsentrasi pada area sambungan dan rangka utama, sedangkan bagian lain seperti kaki dan sandaran mengalami tegangan yang lebih rendah. Konsistensi ini mengindikasikan bahwa model memiliki stabilitas yang baik dalam memprediksi lokasi konsentrasi tegangan.

Untuk memverifikasi bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh ukuran mesh, dilakukan uji konvergensi mesh (*mesh convergence*). Variasi mesh dilakukan dengan mengubah parameter average element size menjadi tiga tingkat, yaitu mesh kasar, sedang, dan halus, sementara parameter lainnya dijaga konstan. Hasil uji konvergensi mesh disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Uji Konvergensi Mesh

Variasi Mesh	Jumlah Elemen	Jumlah Node	Tegangan Maksimum (MPa)
Kasar	12.176	23.728	4,976
Sedang	19.231	36.194	4,885
Halus	26.174	47.875	5,095

Perhitungan konvergensi (%)

- Kasar – sedang : $\frac{4.885 - 4.976}{4.976} \times 100\% = -1.83\% \dots\dots\dots(1)$

- Sedang – halus : $\frac{5.095 - 4.885}{4.885} \times 100\% = 4.30\% \dots\dots\dots(2)$

- Kasar – halus : $\frac{5.095 - 4.976}{4.976} \times 100\% = 2.39\% \dots\dots\dots(3)$

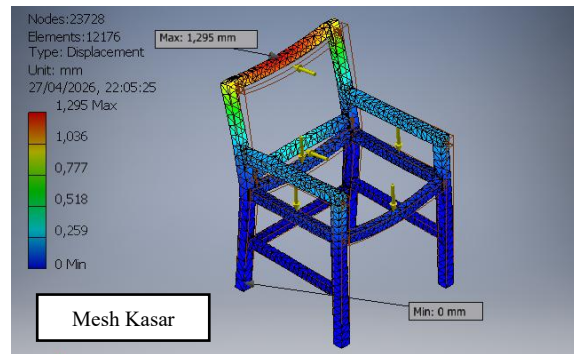
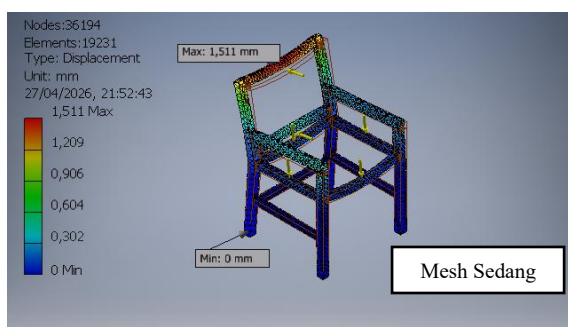
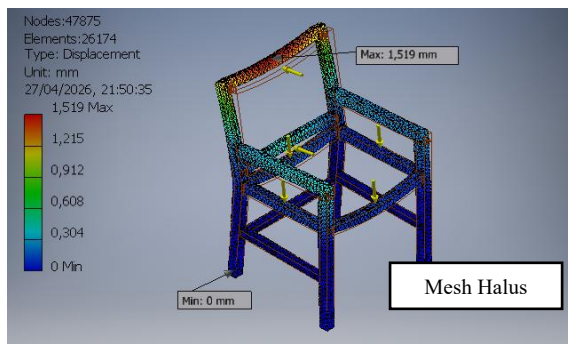
Perubahan nilai tegangan maksimum dari mesh kasar ke mesh sedang sebesar 1,83%, sedangkan dari mesh sedang ke mesh halus sebesar 4,30%. Sementara itu, selisih antara mesh kasar dan mesh halus sebesar 2,39%. Seluruh nilai perubahan tersebut berada di bawah ambang batas 5%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen.

Meskipun terdapat fluktuasi kecil pada nilai tegangan maksimum, tren hasil menunjukkan bahwa nilai tegangan telah stabil dan tidak mengalami perubahan signifikan seiring dengan peningkatan jumlah elemen. Hal ini mengindikasikan bahwa model telah memenuhi kriteria independensi mesh (*mesh independence*), sehingga hasil simulasi dapat dianggap akurat dan tidak dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran mesh.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa konsentrasi tegangan pada struktur furnitur kayu umumnya terjadi pada area sambungan dan rangka dudukan, karena bagian tersebut berperan sebagai jalur utama transfer beban dari pengguna menuju elemen penopang kursi. Studi Matwiej (2025) menunjukkan bahwa analisis Finite Element pada rangka furnitur kayu secara konsisten mengidentifikasi area sambungan sebagai lokasi kritis distribusi tegangan dan deformasi [17]. Selain itu, penelitian terkini pada struktur kursi kayu juga menunjukkan bahwa tegangan maksimum cenderung terlokalisasi pada daerah sambungan, khususnya pada elemen yang berfungsi sebagai penghubung antar komponen structural [18].

Analisis Deformasi dan Konvergensi Mesh

Selain analisis distribusi tegangan, evaluasi kinerja struktural kursi juga dilakukan melalui analisis deformasi total (*total deformation*) akibat pembebanan statis. Parameter ini penting untuk menilai tingkat kekakuan (*stiffness*) struktur serta kenyamanan dan keamanan penggunaan produk furnitur. Pembebanan yang digunakan mengacu pada standar EN 12520, yaitu beban sebesar 1300 N pada dudukan dan 450 N pada sandaran.



Gambar 5 Deformasi Struktur

Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada bagian sandaran atas kursi, khususnya pada elemen rangka sandaran yang tidak memiliki penopang langsung. Kondisi ini konsisten secara mekanis, dimana bagian tersebut mengalami momen lentur terbesar akibat kombinasi beban dari dudukan dan sandaran. Sementara itu, bagian kaki dan rangka bawah menunjukkan deformasi yang relatif kecil karena berfungsi sebagai tumpuan utama dengan kekakuan yang lebih tinggi.

Untuk memastikan keandalan hasil deformasi, dilakukan uji konvergensi mesh dengan tiga variasi jumlah elemen, yaitu mesh kasar, sedang, dan halus, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai deformasi maksimum sebagai berikut:

- Mesh kasar (12.176 elemen): 1,295 mm
- Mesh sedang (19.231 elemen): 1,511 mm
- Mesh halus (26.174 elemen): 1,519 mm

Hasil ini menunjukkan bahwa deformasi maksimum meningkat seiring dengan peningkatan jumlah elemen, yang mengindikasikan bahwa mesh yang lebih halus mampu menangkap respons deformasi struktur secara lebih akurat, terutama pada area dengan gradien tegangan tinggi.

Hasil uji konvergensi menunjukkan bahwa selisih deformasi antara mesh sedang dan mesh halus hanya sebesar 0,53%, sedangkan perbedaan antara mesh kasar dengan mesh lainnya cukup signifikan (>16%). Hal ini mengindikasikan bahwa mesh kasar belum mampu merepresentasikan respons deformasi secara akurat, sementara mesh sedang sudah cukup mendekati kondisi konvergen.

Analisis Safety factor dan Konvergensi Mesh

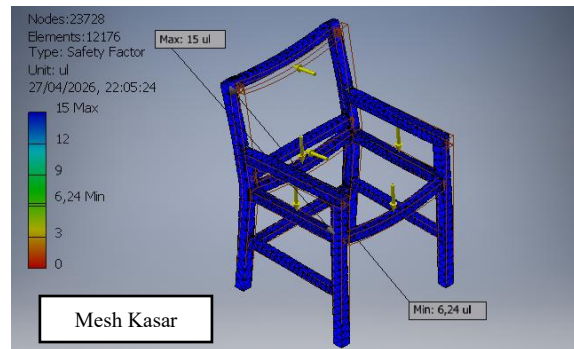
Selain distribusi tegangan, evaluasi kinerja struktur juga dilakukan menggunakan parameter *safety factor* (SF) untuk menilai tingkat keamanan struktur terhadap potensi kegagalan. Nilai *safety factor* diperoleh berdasarkan perbandingan antara kekuatan material dengan tegangan kerja (*von Mises stress*) yang terjadi pada struktur.

Nilai *safety factor* minimum yang diperoleh pada masing-masing variasi mesh adalah sebagai berikut:

- Mesh kasar: SF_min = 6,24
- Mesh sedang: SF_min = 6,35
- Mesh halus: SF_min = 6,09

Nilai *safety factor* minimum tersebut terlokalisasi pada area yang sama dengan tegangan maksimum, yaitu pada sambungan antara sandaran badan dan sandaran lengan. Hal ini menunjukkan konsistensi antara hasil analisis tegangan dan *safety factor*, di mana daerah dengan konsentrasi tegangan tertinggi secara langsung menjadi lokasi kritis terhadap potensi kegagalan struktur.

Pola distribusi *safety factor* pada ketiga variasi mesh juga menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan distribusi tegangan. Nilai *safety factor* rendah terkonsentrasi pada area sambungan dan rangka utama, sedangkan bagian lain seperti kaki dan sandaran memiliki nilai *safety factor* yang tinggi. Konsistensi ini mengindikasikan bahwa model memiliki stabilitas yang baik dalam memprediksi tingkat keamanan struktur.



Gambar 6 *Safety factor*

Untuk memastikan bahwa hasil *safety factor* tidak dipengaruhi oleh ukuran mesh, dilakukan evaluasi konvergensi dengan membandingkan nilai minimum *safety factor* pada setiap variasi mesh. Selisih antara mesh halus dan sedang sebesar $\pm 4,3\%$, sedangkan antara mesh halus dan kasar sebesar $\pm 2,5\%$. Nilai deviasi ini relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi ($<5\%$), sehingga menunjukkan bahwa hasil telah mencapai kondisi *mesh convergence*.

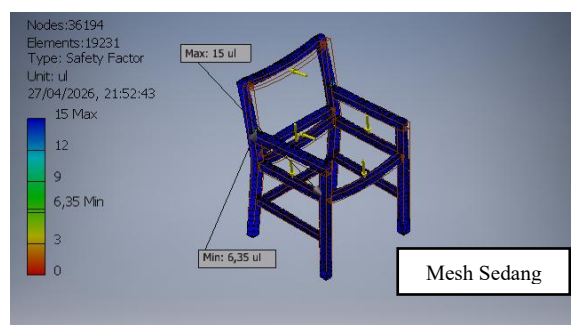
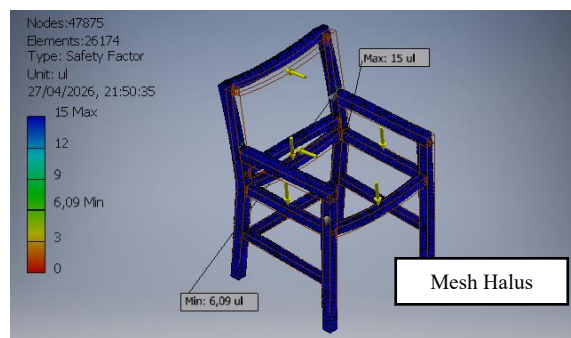
Mesh halus menghasilkan nilai *safety factor* minimum yang paling rendah, yang menunjukkan bahwa mesh dengan kerapatan lebih tinggi mampu menangkap konsentrasi tegangan secara lebih akurat. Hal ini sejalan dengan hasil analisis distribusi tegangan sebelumnya, di mana peningkatan jumlah elemen memberikan representasi gradien tegangan yang lebih detail, khususnya pada area sambungan.

Secara keseluruhan, nilai *safety factor* minimum yang berada pada rentang 6,09–6,35 menunjukkan bahwa struktur memiliki tingkat keamanan yang tinggi terhadap pembebanan yang diberikan. Nilai ini jauh di atas batas minimum ($SF = 1$), sehingga struktur dapat dinyatakan aman.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis kekuatan struktural *arm chair* berbahan kayu jati menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) dengan mempertimbangkan sifat ortotropik material dan pembebanan berbasis standar EN 12520. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum berada pada kisaran ± 5 MPa dan terlokalisasi pada area sambungan antara sandaran dan rangka utama, yang berfungsi sebagai jalur utama transfer beban.

Nilai deformasi maksimum sebesar $\pm 1,51$ mm menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai, sedangkan faktor keamanan minimum yang berada pada rentang 6,09–6,35 mengindikasikan bahwa struktur berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan yang diberikan. Hasil uji konvergensi mesh menunjukkan bahwa



seluruh parameter (tegangan, deformasi, dan faktor keamanan) telah memenuhi kriteria independensi mesh dengan deviasi di bawah 5%, sehingga hasil simulasi dapat dinyatakan akurat dan reliabel.

Distribusi tegangan menunjukkan bahwa sebagian besar komponen struktur mengalami tegangan yang relatif rendah, khususnya pada bagian kaki dan sandaran. Hal ini mengindikasikan adanya potensi overdesign, sehingga optimasi dimensi pada area tersebut dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan material tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada CV Riverina atas dukungan dan kerja sama yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya dalam penyediaan data, objek penelitian, serta informasi teknis terkait produk kursi *arm chair* yang dianalisis. Dukungan tersebut sangat membantu dalam proses analisis dan penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Rahmat, T. R. Fitrianto, Y. N. Ulfia and G. Prakoso, "ANALISIS SIMULASI PEMBEBANAN STATIS TERHADAP SAMBUNGAN DOWEL PADA PRODUK CURVED FEET STOOL," *Jurnal Ilmiah Desain dan Konstruksi*, vol. 23, no. 2, pp. 179-189, 2024.
- [2] E. Ceylan, E. Guray and A. Kasal, "Structural Analyses Of Wooden Chairs By Finite Element Method (Fem) And Assessment Of The Cyclic Loading Performance In Comparison With Allowable Design Loads," *Maderas Ciencia y tecnología*, vol. 23, no. 19, pp. 1-16, 2021.
- [3] I. Miranda, V. Sousa and H. Pereira, "Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor," *Journal of Wood Science*, vol. 57, pp. 171-178, 2011.
- [4] J. Smardzewski, "Effect Of Wood Species And Glue Type On Contact Stresses In A Mortise And Tenon Joint," *Mechanical Engineering Science*, pp. 1-7, 2008.
- [5] L. Matwiej, K. Wiaderek, W. Jarecki, D. Orlikowski and M. Wieruszewski, "Modelling Upholstered Furniture Frames Using the Finite Element Method," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 1-17, 2025.
- [6] L. V. de Souza, J. E. C. da Silva, T. L. B. Azevedo, A. R. P. Mascarenhas, L. A. U. Arias, B. L. C. Pereira and A. C. Oliveira, "Wood Quality of Young *Tectona grandis* L. f. Trees and Its Relationship with Genetic Material and Planting Site in Mato Grosso, Brazil," *Forest*, pp. 1-18, 2024.
- [7] M. Hitka, M. Nad, M. Gejdos, P. Joscak, A. Jurek and Z. Balazova, "The effect of body mass on designing the structural elements of wooden chairs," *BioResources*, vol. 17, no. 2, pp. 3378-3397, 2022.
- [8] M. S. Mazloomi, W. He and D. P. Evans, "Finite Element Modelling of the Effect of Adhesive Z-Connections on the Swelling of a Laminated Wood Composite," *Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 442, pp. 1-14, 2023.
- [9] MatWeb, LLC, "Material Property Data Sheet," MatWeb, n.d. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=47a0eaf6bcd64e2f8f6425c872479b6d>. [Accessed 27 April 2026].
- [10] N. Tankut, A. N. Tankut and M. Zor, "Finite Element Analysis of Wood Materials," *Drvna industrija*, vol. 65, no. 2, pp. 159-171, 2014.
- [11] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, Pearson, 2016.
- [12] R. Merdan, "Finite Element Analysis of the Structural Performance of a Specific Wooden-stool Type and Style," *Journal of Materials Science Research and Reviews*, vol. 8, no. 2, pp. 286-294, 2025.
- [13] S. Dahlan and R. A. N. Al Hakim, "Optimasi Desain Kursi Menggunakan Metode Elemen Hingga," *ROTASI*, vol. 20, no. 3, pp. 160-164, 2020.
- [14] S. Moaveni, *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [15] The Big Kitchen, "Chairs: 2 x Mylor Dining Chairs with Arms, Black & Teak," [Online]. Available: <https://www.thebigkitchen.co.uk/product/chairs-2-x-mylor-dining-chairs-with-arms-black-teak/>.

- [16] W. Hu and H. Guan, "A finite element model of semi-rigid mortise-and-tenon joint considering glue line and friction coefficient," *Journal of Wood Science*, vol. 65, no. 14, pp. 1-9, 2019.
- [17] W. Hu and N. Liu, "Numerical and Optimal Study on Bending Moment Capacity and Stiffness of Mortise-and-Tenon Joint for Wood Products," *Forest*, pp. 1-12, 2020.
- [18] X. He, "A review of finite element analysis of adhesively bonded joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, no. 4, pp. 248-264, 2011.

ANALISIS KEANDALAN MESIN JET DYEING MENGGUNAKAN METODE RCM DAN FMEA PADA INDUSTRI TEKSTIL

Rangga Putra Irdian¹, Jojo Sumarjo¹, Deri Teguh Santoso¹, Marno¹, Kayla Rahma Nourizka²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

² Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat

anrangga42@gmail.com¹

Abstrak

Tingginya frekuensi *downtime* pada mesin *jet dyeing* Tonghue di PT. Toyobo Manufacturing Indonesia berdampak langsung pada penurunan efisiensi dan keandalan proses produksi tekstil. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi moda kegagalan, menganalisis tingkat *downtime*, serta menentukan strategi pemeliharaan yang tepat berbasis data historis periode Januari 2020–Desember 2024. Metode yang diterapkan adalah *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang didukung oleh analisis *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebab kerusakan didominasi oleh kebocoran dengan total 75 kejadian dari 144 total insiden, serta keausan komponen pada *mechanical seal*, *bearing*, dan *packing*. Mesin T 30-2 mencatat frekuensi kerusakan tertinggi (31 kejadian, MTBF = 45.106 menit), sedangkan mesin T 20-2 memiliki total waktu henti terbesar (13.160 menit, MTTR = 506 menit/kejadian). Analisis FMEA menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi sebesar 192 pada mesin T 20-2 dan T 30-2. Total potensi kerugian produksi akibat *downtime* seluruh mesin mencapai 15.524,3 kg. Berdasarkan nilai MTBF, *interval preventive maintenance* diusulkan pada 80% nilai MTBF, berkisar antara 25,1 hingga 40,9 hari operasi per mesin, yang berpotensi mengurangi kerugian produksi secara signifikan apabila diimplementasikan secara konsisten.

Kata kunci : *jet dyeing*, *downtime*, RCM, FMEA, *preventive maintenance*.

Abstract

The high frequency of *downtime* on Tonghue *jet dyeing* machines at PT. Toyobo Manufacturing Indonesia significantly reduces production efficiency and system reliability. This study aims to identify failure modes, analyze *downtime* levels, and establish appropriate maintenance strategies based on historical data from January 2020 to December 2024. The methodology employs *Reliability Centered Maintenance* (RCM) supported by MTBF, MTTR, and *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Results indicate that failures are dominated by leakage (75 of 144 total incidents) and component wear, particularly in *mechanical seals*, *bearings*, and *packing*. Machine T 30-2 recorded the highest failure frequency (31 incidents, MTBF = 45,106 minutes), while machine T 20-2 exhibited the longest *downtime* (13,160 minutes, MTTR = 506 minutes/incident). FMEA analysis yielded the highest *Risk Priority Number* (RPN) of 192 for machines T 20-2 and T 30-2. Total potential production loss across all machines was estimated at 15,524.3 kg. Based on MTBF values, *preventive maintenance intervals* are proposed at 80% of the MTBF, ranging from 25.1 to 40.9 operational days per machine, which is projected to substantially reduce production losses if consistently implemented.

Key words : *jet dyeing*, *downtime*, RCM, FMEA, *preventive maintenance*.

PENDAHULUAN

Pengujian Industri tekstil merupakan salah satu sektor strategis dalam perekonomian Indonesia. Selain menjadi penyumbang devisa negara yang signifikan, industri ini berperan dalam menciptakan lapangan kerja bagi jutaan masyarakat di berbagai

daerah [1]. Keberhasilan industri tekstil nasional tidak terlepas dari kinerja mesin-mesin produksi yang beroperasi secara kontinu dan andal. Salah satu proses krusial dalam produksi kain adalah proses *dyeing* atau pencelupan, yang menentukan keseragaman warna serta tampilan akhir produk.

Mesin *jet dyeing* merupakan peralatan utama dalam proses pencelupan yang bekerja dengan prinsip sirkulasi fluida bertekanan tinggi

pada temperatur operasi hingga 130°C. Kondisi termal dan tekanan yang tinggi secara kontinu menempatkan komponen *sealing* seperti *mechanical seal*, *packing*, dan *O-ring* pada risiko keausan yang signifikan. Permasalahan yang paling sering terjadi adalah *downtime* yang tidak terencana, yang dapat menghambat proses produksi dan berpotensi menurunkan kualitas produk akhir.

Penelitian mengenai strategi pemeliharaan berbasis keandalan (*Reliability Centered Maintenance/RCM*) pada industri manufaktur telah banyak dilakukan. Nurcahyo [2] mendefinisikan RCM sebagai pendekatan sistematis yang mengintegrasikan data keandalan historis dengan analisis kegagalan untuk mengoptimalkan strategi perawatan. Prastiawan dkk. [3] berhasil menerapkan RCM pada mesin amplas *multipleks* di industri *plywood* dan membuktikan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan interval perawatan secara terencana dibandingkan strategi reaktif. Sejalan dengan itu, Islam dkk. [4] mengembangkan metode *Fuzzy FMEA* untuk analisis *preventive maintenance* pada mesin produksi, dan menyimpulkan bahwa identifikasi komponen kritis melalui nilai RPN merupakan langkah fundamental dalam penentuan prioritas perawatan.

Pada konteks mesin pencelupan, Sana dkk. [5] menjelaskan bahwa mesin *jet dyeing* dengan sistem sirkulasi *soft flow* memiliki keunggulan dalam efisiensi penggunaan larutan pewarna, namun rentan terhadap kegagalan pada sistem pompa dan katup akibat paparan bahan kimia bertemperatur tinggi secara berkepanjangan. Fadilah dkk. [6] lebih lanjut mendemonstrasikan bahwa perhitungan MTBF dan MTTR secara kuantitatif memberikan dasar yang objektif bagi perencanaan jadwal *preventive maintenance*, sehingga *downtime* yang tidak terencana dapat diantisipasi.

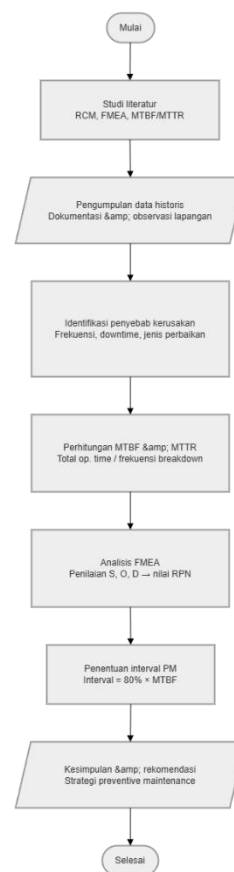
Pada PT. Toyobo Manufacturing Indonesia, mesin *jet dyeing* Tonghue digunakan secara kontinu dalam proses pencelupan kain. Berdasarkan data historis periode Januari 2020 hingga Desember 2024, mesin-mesin tersebut mengalami total 144 kejadian kerusakan dengan total *downtime* keseluruhan mencapai 45.740 menit. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang berjalan saat ini masih bersifat reaktif dan belum optimal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi moda kegagalan (*failure mode*) dominan pada mesin *jet dyeing* Tonghue; (2) menganalisis parameter keandalan MTBF dan MTTR; (3) menentukan komponen kritis berdasarkan nilai RPN melalui FMEA; dan (4) merumuskan strategi pemeliharaan preventif berbasis nilai MTBF yang terukur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Departemen *Dyeing* PT. Toyobo Manufacturing Indonesia, Kawasan KHC Karawang, Jawa Barat. Objek penelitian adalah enam unit mesin *jet dyeing* Tonghue (kode: T 05, T 20-1, T 20-2, T 30-1, T 30-2, T 30-3) yang beroperasi 24 jam per hari. Data yang dianalisis merupakan data historis periode Januari 2020 hingga Desember 2024, mencakup 144 kejadian kerusakan pada seluruh unit mesin.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua metode: (1) dokumentasi, yaitu pengambilan data historis *downtime*, frekuensi kerusakan, dan catatan perbaikan komponen dari sistem arsip perusahaan; dan (2) observasi lapangan, yaitu pengamatan langsung terhadap kondisi operasional mesin dan prosedur pemeliharaan yang berjalan.

Teknik Analisis Data Metode utama adalah RCM dengan dukungan perhitungan keandalan dan FMEA. Langkah analisis disajikan pada Gambar 1 (diagram alir penelitian).



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Analisis dilaksanakan secara bertahap mengikuti kerangka RCM. Pertama, dilakukan perhitungan MTBF dan MTTR menggunakan persamaan berikut [4]:

$$MTBF = \frac{\text{Total Operation Time}}{\text{Frekuensi Breakdown}} \dots\dots\dots(1)$$

$$MTTR = \frac{\text{Total Time to Repair}}{\text{Frekuensi Breakdown}} \dots\dots\dots(2)$$

Di mana *Total Operation Time* diperoleh dari selisih antara total waktu kalender operasional standar (mesin beroperasi 24 jam/hari selama ±1.199 hari dalam periode 5 tahun, atau ±1.405.440 menit untuk seluruh periode) dengan total *downtime* masing-masing mesin. Nilai MTBF yang mendekati satu sama lain pada Tabel 4 merupakan konsekuensi langsung dari dasar penghitungan yang sama: penyebut (*total operation time*) hampir identik karena seluruh mesin tunduk pada kalender operasional yang seragam (jam kerja, hari libur, dan cuti bersama yang sama), sedangkan pembilang (jumlah frekuensi *breakdown*) yang berbeda menjadi pembeda utama nilai MTBF antarmesin.

Nilai MTBF selanjutnya digunakan sebagai landasan penentuan *interval preventive maintenance* (PM) dengan mengaplikasikan rasio keamanan 80% dari nilai MTBF, yang dalam literatur rekayasa keandalan dikenal sebagai pendekatan konservatif untuk memberikan selang waktu penyangga (*buffer*) sebelum peluang kegagalan meningkat signifikan [2]. Persamaannya adalah:

$$\text{Interval PM} = 0,80 \times MTBF$$

Kedua, dilakukan analisis FMEA untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* (RPN) menggunakan persamaan [4]:

$$RPN = S \times O \times D \dots\dots\dots(3)$$

Nilai *Severity* (S) ditentukan berdasarkan rata-rata MTTR aktual masing-masing mesin yang dikonversi ke dalam satuan jam dan dicocokkan dengan tabel kriteria. Nilai *Occurrence* (O) ditentukan berdasarkan rata-rata frekuensi kerusakan tahunan (total frekuensi dibagi 5 tahun) yang dicocokkan dengan tabel kriteria frekuensi. Nilai *Detection* (D) ditentukan berdasarkan kemampuan sistem pemeliharaan perusahaan dalam mendeteksi kegagalan sebelum terjadi, yang dinilai melalui observasi lapangan terhadap prosedur inspeksi yang berlaku. Pendekatan berbasis data historis ini menjamin objektivitas dan replikabilitas penilaian [4].

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Frekuensi Kerusakan dan Downtime

Berdasarkan data historis periode Januari 2020–Desember 2024, diperoleh rekapitulasi frekuensi kerusakan dan total *downtime* untuk setiap unit mesin *jet dyeing* Tonghue sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Frekuensi Kerusakan dan Total Downtime pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Kode Mesin	Frekuensi Perbaikan	Total Downtime (Menit)
T 05	19	6.585
T 20-1	21	6.070
T 20-2	26	13.160
T 30-1	20	8.015
T 30-2	31	7.150
T 30-3	27	4.760

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa mesin T 30-2 memiliki frekuensi kerusakan tertinggi (31 kejadian, 21,5% dari total), sedangkan mesin T 20-2 mencatat total *downtime* terbesar (13.160 menit, 28,8% dari total *downtime*). Paradoks antara frekuensi dan durasi ini memiliki implikasi teknis yang signifikan: mesin T 30-2 mengalami kegagalan paling sering, namun setiap kejadiannya relatif singkat (MTTR = 231 menit); sebaliknya, mesin T 20-2 mengalami kegagalan yang lebih jarang tetapi dengan durasi perbaikan yang jauh lebih panjang (MTTR = 506 menit), mengindikasikan kompleksitas kerusakan yang lebih tinggi pada mesin tersebut.

2. Analisis Penyebab Kerusakan

Tabel 2 menyajikan distribusi penyebab kerusakan pada seluruh unit mesin selama periode observasi.

Tabel 2 Distribusi Penyebab Kerusakan pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Penyebab Kerusakan	T 05	T 20-1	T 20-2	T 30-1	T 30-2	T 30-3
Bocor	10	10	13	11	17	14
Error	3	0	4	2	1	2
Karat	1	0	2	1	1	0
Rusak Aus	2	5	0	1	2	0
Retak	2	5	4	2	6	6
Retak Kotoran	0	1	0	0	1	1
Kotoran	0	0	2	1	1	1
Kerusakan akan Gear/Baut	0	0	1	2	2	2
Total	19	21	26	20	31	27

Kebocoran (*leakage*) merupakan penyebab kegagalan yang paling dominan dengan total 75 kejadian (52,1% dari 144 total insiden). Keausan (aus) menempati posisi kedua dengan 25 kejadian, disusul kerusakan komponen (rusak) sebanyak 10 kejadian.

Dominasi kebocoran sebagai penyebab *downtime* memiliki justifikasi teknis yang jelas dan dapat dijelaskan melalui *Root Cause Analysis* (RCA). Mesin *jet dyeing* Tonghue beroperasi pada tekanan kerja hingga 3–4 bar dan temperatur larutan pencelup mencapai 130°C secara siklus berulang. Paparan termal dan tekanan tinggi yang kontinu ini menyebabkan degradasi material elastomer pada *mechanical seal* dan *packing*, yang bermanifestasi sebagai kebocoran (*leakage*). Mekanisme kegagalannya adalah: (a) siklus termal berulang menyebabkan *thermal fatigue* dan *creep* pada material karet/elastomer *seal*, yang secara bertahap kehilangan elastisitas dan kemampuan *sealing*-nya; (b) paparan kimia dari larutan pewarna bersifat korosif dan dapat mendegradasi komposisi material *seal* dari dalam; dan (c) beban hidrodinamik dari putaran pompa sirkulasi menyebabkan aus abrasif pada *mechanical seal face*. Ketiga faktor ini bekerja secara sinergis, yang menjelaskan mengapa penggantian *mechanical seal* mendominasi jenis perbaikan (30 penggantian dari total 144 aksi, atau 20,8%).

3. Jenis Perbaikan Komponen Kritis

Tabel 3 Jenis Perbaikan Komponen Kritis pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Jenis Perbaikan	T 05	T 20-1	T 20-2	T 30-1	T 30-2	T 30-3
Ganti <i>Mechanical seal</i>	3	2	5	5	8	7
Ganti <i>Bearing</i>	0	5	4	2	6	6
Ganti <i>Packing</i>	4	1	1	1	2	1
Ganti O-Ring	1	0	1	2	2	1
Ganti <i>Rubber Coupling</i>	1	0	2	0	4	0
Perbaikan <i>Valve</i>	0	3	1	2	1	2
<i>Overhaul</i>	1	0	1	1	1	1
Lainnya	9	10	11	7	7	9
Total	19	21	26	20	31	27

Data pada Tabel 3 mengkonfirmasi bahwa penggantian *mechanical seal* (total 30 kali), *bearing* (total 23 kali), dan *packing* (total 10 kali) merupakan tiga jenis perbaikan yang paling dominan. Ketiga komponen ini secara bersama-sama merepresentasikan 43,8% dari seluruh aksi perbaikan, mengkonfirmasi status mereka sebagai komponen kritis (*critical components*) yang harus menjadi fokus utama program *preventive maintenance*.

4. Perhitungan MTBF dan MTTR

Hasil perhitungan parameter keandalan mesin disajikan pada Tabel 4. Nilai *Total Operation*

Time diperoleh dari total waktu kalender standar ($\pm 1.405.440$ menit untuk seluruh periode 5 tahun, mencerminkan operasi 24 jam/hari pada hari kerja aktif, setelah dikurangi hari libur nasional, cuti bersama, dan akhir pekan) dikurangi total *downtime* masing-masing mesin. Nilai yang hampir seragam pada kolom *Total Operation Time* (rentang 1.392.280–1.400.680 menit) merupakan konsekuensi wajar dari kesamaan kalender operasional yang diberlakukan pada seluruh unit mesin, sementara perbedaan antarmesin semata-mata ditentukan oleh besarnya total *downtime* masing-masing.

Tabel 4 Hasil Perhitungan MTBF dan MTTR Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Kode Mesin	Time to Repair (menit)	Total Operation Time (menit)	MTBF (menit)	MTTR (menit)
T 05	6.585	1.398.855	73.624	347
T 20-1	6.070	1.399.370	66.637	289
T 20-2	13.160	1.392.280	53.549	506
T 30-1	8.015	1.397.425	69.871	401
T 30-2	7.150	1.398.290	45.106	231
T 30-3	4.760	1.400.680	51.877	176

Mesin T 05 menunjukkan keandalan tertinggi dengan MTBF = 73.624 menit ($\pm 51,1$ hari) dan MTTR = 347 menit ($\pm 5,8$ jam), sementara mesin T 30-2 memiliki keandalan terendah dengan MTBF = 45.106 menit ($\pm 31,3$ hari). Nilai MTTR tertinggi dimiliki mesin T 20-2 sebesar 506 menit ($\pm 8,4$ jam), yang mengindikasikan kompleksitas perbaikan yang signifikan, konsisten dengan ditemukannya dua *overhaul* besar (*over haul*) dan durasi *cek hike* yang panjang (7.680 menit) pada mesin tersebut.

5. Analisis FMEA dan Penentuan RPN

Penentuan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) didasarkan pada tiga kriteria tabel yang ditetapkan secara objektif menggunakan data historis perusahaan, sebagaimana disajikan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7.

Tabel 5 Kriteria *Severity* (S) Berdasarkan Rata-rata MTTR

Nilai S	Kriteria	Rata-rata Downtime	Dampak pada Produksi
1	Sangat Rendah	≤ 1 jam	Hampir tidak berdampak pada produksi
2	Rendah	1–2 jam	Gangguan kecil, dapat diatasi tanpa menghentikan produksi
3	Cukup Rendah	2–3 jam	Mengurangi efisiensi, masih dapat diatasi dengan penjadwalan ulang

4	Sedang	3–4 jam	Menghambat sebagian proses, menyebabkan keterlambatan <i>output</i> Produksi terganggu signifikan,
5	Cukup Tinggi	4–5 jam	menyebabkan backlog <i>Downtime</i> cukup panjang, berdampak pada pengiriman produk
6	Tinggi	5–6 jam	
7	Sangat Tinggi	6–7 jam	Produksi terhenti lama, kehilangan pendapatan signifikan
8	Parah	7–9 jam	Gangguan produksi sangat besar, perlu tindakan segera
9	Sangat Parah	9–10 jam	Produksi hampir tidak berjalan, dampak finansial besar
10	Kritis	> 10 jam	<i>Downtime</i> ekstrem, berpotensi penghentian operasional sementara

Tabel 6 Kriteria *Occurrence* (O) Berdasarkan Frekuensi Tahunan

Nilai O	Kriteria	Frekuensi Kejadian
1	Sangat Jarang	< 1× per tahun
2	Jarang Terjadi	1× per tahun
3	Tidak Sering	2× per tahun
4	Kadang-kadang	3–4× per tahun
5	Cukup Sering	4–5× per tahun
6	Sering Terjadi	5–6× per tahun
7	Sangat Sering	6–7× per tahun
8	Hampir Selalu	7–8× per tahun
9	Nyaris Pasti	8–9× per tahun
10	Selalu Terjadi	> 9× per tahun

Tabel 7 Kriteria *Detection* (D) Berdasarkan Kemampuan Deteksi Sistem

Nilai D	Kriteria	Kemungkinan Terdeteksi
1	Sangat Mudah Dideteksi	≥ 99%
2	Mudah Dideteksi	≥ 95%
3	Cukup Mudah Dideteksi	≥ 85%
4	Terkadang Dapat Dideteksi	≥ 75%
5	Tidak Selalu Dapat Dideteksi	≥ 60%
6	Cukup Sulit Dideteksi	≥ 40%
7	Sulit Dideteksi	≥ 20%
8	Sangat Sulit Dideteksi	≥ 10%
9	Hampir Tidak Dapat Dideteksi	< 5%
10	Tidak Ada Mekanisme Deteksi	0%

Sebagai contoh justifikasi skor untuk mesin T 20-2: (a) S = 8 karena MTTR rata-rata = 506

menit ≈ 8,4 jam, yang masuk dalam rentang 7–9 jam (kriteria "Parah"); (b) O = 6 karena frekuensi kerusakan 26 kejadian dalam 5 tahun = 5,2 kejadian/tahun, masuk dalam rentang 5–6 kali/tahun (kriteria "Sering Terjadi"); (c) D = 4 karena sistem inspeksi hanya mampu mendeteksi kegagalan dengan probabilitas ≥ 75% berdasarkan observasi lapangan, menunjukkan deteksi yang belum konsisten. Dengan justifikasi yang analog dan berbasis data, skor untuk seluruh mesin ditentukan sebagaimana tersaji pada Tabel 8.

Tabel 8 Nilai RPN Hasil Analisis FMEA Mesin Jet *dyeing Tonghue*

Kode Mesin	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN	Prioritas
T 05	6	3	6	108	Sedang
T 20-1	5	4	5	100	Sedang
T 20-2	8	6	4	192	Kritis
T 30-1	7	5	5	175	Tinggi
T 30-2	4	8	6	192	Kritis
T 30-3	3	7	4	84	Rendah

Mesin T 20-2 dan T 30-2 memperoleh RPN tertinggi sebesar 192, namun dengan profil risiko yang berbeda. Mesin T 20-2 memiliki RPN = $8 \times 6 \times 4 = 192$, yang didominasi oleh nilai *Severity* tinggi (dampak perbaikan yang panjang dan parah), sedangkan mesin T 30-2 memiliki RPN = $4 \times 8 \times 6 = 192$ yang didominasi oleh nilai *Occurrence* sangat tinggi (kegagalan sangat sering terjadi) dikombinasikan dengan *Detection* yang sulit. Perbedaan profil ini memerlukan respons strategi yang berbeda: mesin T 20-2 membutuhkan perbaikan kualitas komponen dan prosedur perbaikan untuk memperpendek MTTR, sementara mesin T 30-2 membutuhkan peningkatan frekuensi inspeksi untuk mengurangi laju kegagalan.

6. Estimasi Loss Produksi dan Potensi Penghematan

Mesin *jet dyeing* beroperasi dengan kapasitas produksi: 30 kg/480 menit untuk T 05; 170 kg/480 menit untuk T 20-1 dan T 20-2; dan 200 kg/480 menit untuk T 30-1, T 30-2, dan T 30-3. Total estimasi kerugian produksi akibat *downtime* disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Estimasi Potensi Kerugian Produksi Akibat *Downtime* (2020–2024)

Kode Mesin	Produksi per 480 menit (kg)	Total Downtime (menit)	Total Loss Produksi (kg)
T 05	30	6.585	411,6

T 20-1	170	6.070	2.149,8
T 20-2	170	13.160	4.660,8
T 30-1	200	8.015	3.339,6
T 30-2	200	7.150	2.979,2
T 30-3	200	4.760	1.983,3
Total	—	45.740	15.524,3

Total potensi kerugian produksi seluruh mesin selama lima tahun mencapai 15.524,3 kg kain, dengan kontribusi terbesar dari mesin T 20-2 (4.660,8 kg) dan T 30-1 (3.339,6 kg). Apabila program *preventive maintenance* dengan interval yang diusulkan (Tabel 10) diimplementasikan secara konsisten, maka target pengurangan frekuensi *downtime* tidak terencana diperkirakan dapat mencapai 30–40% (asumsi konservatif berdasarkan literatur industri tentang efektivitas PM), yang berimplikasi pada potensi penghematan kerugian produksi sebesar 4.657–6.210 kg per siklus lima tahun.

7. Usulan Interval preventive maintenance

Berdasarkan nilai MTBF yang diperoleh, *interval preventive maintenance* (PM) diusulkan pada 80% nilai MTBF. Rasio 80% dipilih karena pada titik tersebut, berdasarkan kurva keandalan Weibull, peluang kegagalan mulai meningkat secara akseleratif sehingga intervensi PM sebelum titik ini secara statistik lebih efektif daripada menunggu hingga MTBF tercapai [5].

Tabel 10 Usulan *Interval preventive maintenance* Berdasarkan Nilai MTBF

Kode Mesin	MTBF (menit)	Interval PM (80% MTBF) (menit)	Interval PM (hari)	MTTR (menit)
T 05	73.624	58.899	40,9	347
T 20-1	66.637	53.310	37,0	289
T 20-2	53.549	42.839	29,7	506
T 30-1	69.871	55.897	38,8	401
T 30-2	45.106	36.085	25,1	231
T 30-3	51.877	41.502	28,8	176

Interval PM untuk mesin T 30-2 yang paling kritis adalah 25,1 hari (36.085 menit), sedangkan mesin T 05 dengan keandalan terbaik dapat dijadwalkan setiap 40,9 hari (58.899 menit). Jadwal ini harus diintegrasikan dengan sistem *work order* perusahaan dan mencakup pemeriksaan serta penggantian preventif pada *mechanical seal*, *bearing*, dan *packing* sebagai komponen kritis prioritas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis RCM, MTBF/MTTR, dan FMEA pada enam unit mesin *jet dyeing* Tonghuc di PT. Toyobo Manufacturing Indonesia periode 2020–2024, dapat disimpulkan:

1. Moda kegagalan dominan adalah kebocoran komponen *sealing** (75 dari 144 kejadian, 52,1%), yang secara teknis disebabkan oleh degradasi material elastomer akibat siklus termal berulang pada temperatur operasi $\pm 130^{\circ}\text{C}$, paparan kimia korosif, dan aus abrasif pada permukaan *seal face**. Komponen kritis yang paling sering memerlukan penggantian adalah *mechanical seal** (30 kali), *bearing** (23 kali), dan *packing** (10 kali).
2. Analisis MTBF dan MTTR menunjukkan bahwa mesin T 30-2 memiliki keandalan terendah (MTBF = 45.106 menit, $\pm 31,3$ hari) dengan frekuensi kegagalan tertinggi, sementara mesin T 20-2 memiliki MTTR tertinggi (506 menit/kejadian) yang menunjukkan kompleksitas perbaikan tertinggi. Mesin T 05 mencatat performa terbaik dengan MTBF = 73.624 menit ($\pm 51,1$ hari).
3. Analisis FMEA mengidentifikasi mesin T 20-2 (S=8, O=6, D=4) dan T 30-2 (S=4, O=8, D=6) sebagai mesin dengan RPN tertinggi (192) dan memerlukan prioritas penanganan. Kedua mesin memiliki profil risiko berbeda: T 20-2 didominasi *severity* tinggi akibat durasi perbaikan panjang, sedangkan T 30-2 didominasi *occurrence* tinggi akibat frekuensi kegagalan sangat sering.
4. Total potensi kerugian produksi selama lima tahun mencapai 15.524,3 kg kain. *Interval preventive maintenance* diusulkan pada 80% MTBF, berkisar 25,1–40,9 hari per mesin (T 30-2 paling sering pada 25,1 hari; T 05 paling jarang pada 40,9 hari), yang berpotensi mengurangi kerugian produksi sebesar 30–40% apabila diimplementasikan secara konsisten.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Toyobo Manufacturing Indonesia yang telah memberikan izin dan fasilitas penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang atas dukungan bimbingan akademik selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Anugrah *Et Al.*, “Analisis Industri Tekstil Di Jawa Barat Sebelum Dan Setelah Krisis Ekonomi Universitas Pakuan,” Vol. 2, No. 2, Pp. 118–135, 2024, Doi: 10.59581/Doktrin-Widyakarya.V2i1.2579.
- [2] A. N. Rahmat Nurcahyo, “Manajemen Pemeliharaan Preventive,” 2024.
- [3] A. Prastiawan *Et Al.*, “Metode Rcm Untuk Sistem Perawatan Mesin Amplas Multipleks Pada Pabrik Plywood Rcm Method For Multiplex Sandary Machine Maintenance System At Plywood Factory,” *Jurnal Ilmiah Teknologi Fst Undana*, Vol. 15, No. 2, 2021.
- [4] A. Wibi Sana, E. Novarini, U. Prayudie, R. Marlina Balai Besar Tekstil, And J. Jenderal Ahmad Yani No, “Studi Penggunaan Mesin Pencelupan Sistem Jet Tipe Soft Flow Untuk Pencelupan Kain Poliester Dan Kain Rayon A Study On Soft Flow Type *Jet dyeing* Machine Application For Polyester And Rayon Fabric Dyeing Process,” 2015.
- [5] H. P. R. A. K. Nur Fadilah Fatma, “Analisis Preventive Maintenance Dengan Metode Menghitung *Mean Time Between Failure* (Mtbf) Dan *Mean Time To Repair*(Mttr) (Studi Kasus Pt. Gajah Tunggal Tbk)”.
- [6] S. S. Islam, T. Lestari, A. Fitriani, And D. A. Wardani, “Analisis Preventive Maintenance Pada Mesin Produksi Dengan Metode Fuzzy Fmea,” 2020.

Identifikasi risiko bahaya kerja dengan metode hiradc di PT. Pelabuhan Tanjung Priok pada bagian *maintenance* mesin gantry *lifting crane* (GLC)

Ariyo Agustianto Wibowo¹, Sulaeman Deni Ramdani¹, Misar Hardiyan¹

¹ Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Mesin, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Ciwaru Raya, No. 25, Serang Banten, 42117

2284220024@untirta.ac.id¹

Abstrak

Semua jenis pekerjaan pastinya memiliki risiko bahaya dengan tingkatan masing-masing termasuk pekerjaan pada bagian *maintenance*. Dari permasalahan di atas, penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi bahaya, penilaian risiko, dan pengendalian risiko bahaya di PT Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten dengan menggunakan metode HIRADC. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian deskriptif. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui observasi langsung. Kemudian, data tersebut dianalisa dengan menggunakan Metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assesment, and Determine Control*). Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat lima jenis pekerjaan yang diamati meliputi pengelasan, perawatan mesin bakar, pembersihan ruang kelistrikan, pelumasan, dan *preventif maintenance*. Hasil identifikasi menunjukkan tingkat risiko bervariasi dari rendah hingga tinggi, dengan risiko tertinggi pada pekerjaan di ketinggian. Upaya pengendalian yang direkomendasikan meliputi penggunaan APD, pelatihan keselamatan kerja, penerapan prosedur *lockout-tagout*, serta pemasangan sistem proteksi jatuh. Penerapan pengendalian ini penting untuk meminimalkan kecelakaan kerja dan meningkatkan keselamatan di lingkungan dermaga.

Kata kunci : HIRADC, identifikasi bahaya, penilaian risiko kerja, keselamatan kerja.

Abstract

All types of work certainly have a risk of danger with their respective levels including work in the maintenance section. From the above problems, the research aims to identify hazards, risk assessment, and risk control of hazards at PT Pelabuhan Tanjung Priok Banten Branch using the HIRADC method. This research uses qualitative methods with descriptive research types. The data in this study were taken from direct observation during the process of implementing industrial practice, which is one month. Then, the data was analysed using the HIRADC Method (Hazard Identification, Risk Assessment, and Determine Control). The results showed that there were five types of work observed including welding, combustion engine maintenance, cleaning the electrical room, lubrication, and preventive maintenance. The identification results show that the risk level varies from low to high, with the highest risk in work at height. Recommended control measures include the use of PPE, occupational safety training, implementation of lockout-tagout procedures, and installation of fall protection systems. The implementation of these controls is important to minimise work accidents and improve safety in the dock environment.

Key words : HIRADC, hazard identifiaion, occupational risk assessment, occupational safety.

PENDAHULUAN

Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki peranan penting dalam menjamin kesuksesan suatu organisasi atau industri. Oleh karena itu, para pekerja wajib memperoleh perhatian lebih dari industri khususnya dalam hal keselamatan saat bekerja. Kemnaker memberikan keterangan bahwa

disetiap tahunnya selalu terjadi peningkatan kasus kecelakaan kerja yang terjadi di Indonesia. Berdasarkan data dari kemnaker (BPJS Ketenagakerjaan) pada tahun 2024 kemnaker melaporkan terjadinya 162.327 insiden kecelakaan kerja. Sekitar 91,83% di antaranya adalah insiden yang melibatkan peserta yang menerima upah, sementara 7,26% adalah insiden di kalangan peserta yang tidak menerima upah, dan 0,91% mencakup

insiden yang melibatkan peserta layanan konstruksi. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan kasus tersebut terus terjadi, diantaranya kurangnya penerapan Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3), minimnya kesadaran akan keselamatan kepada setiap individu pada saat berada di tempat bekerja, dan beberapa faktor lainnya.

Istilah Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) tentunya tidak asing dalam dunia pekerjaan. K3 merupakan segala kegiatan yang dilakukan untuk menjamin kesehatan dan keselamatan pekerja melalui usaha pencegahan dari kecelakaan kerja sampai bahaya penyakit akibat kerja [2]. Penerapan K3 bertujuan untuk menghindari terjadinya kecelakaan di tempat kerja, penyakit yang disebabkan oleh pekerjaan, serta melindungi aspek-aspek produksi agar efisien dan produktivitas dapat terus meningkat [3]. Bahkan dalam Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003 sudah mengatur bahwa K3 merupakan salah satu bentuk perlindungan bagi para pekerja. Oleh sebab itu penerapan K3 di dunia kerja perlu dilakukan.

Dalam penerapan K3 terdapat sistem yang mengatur hal tersebut yang dinamakan Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (SMK3). Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (SMK3) merupakan bagian dari sistem manajemen yang komprehensif, yang mencakup struktur organisasi perencanaan, tanggung jawab, evaluasi, implementasi, serta kebijakan yang mengatur tentang K3 untuk mengendalikan dampak yang berkaitan dengan pekerjaan dalam rangka menciptakan lingkungan kerja yang aman dan nyaman [4]. Berdasarkan OHSAS 18001:2007, SMK3 merupakan bagian dari sistem manajemen organisasi yang digunakan untuk merancang dan mengimplementasikan kebijakan K3 serta mengelola risiko yang dihadapi oleh organisasi tersebut [5]. Setiap industri pasti mengelola keamanan serta perlindungan pada area kerja beserta keselamatan para pekerjanya. Oleh karena itu, semua industri wajib menjalankan peraturan yang berlaku dan sistem yang sudah dijalankan.

PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten merupakan perusahaan yang bergerak di bidang jasa kepelabuhanan dan logistik. Perusahaan ini adalah cabang dari kantor pusat PT Pelabuhan Tanjung Priok yang membawahi wilayah Banten dan sekitarnya dalam kegiatan operasionalnya. Layanannya mencakup penyediaan serta pengelolaan perairan dan kolam pelabuhan untuk lalu lintas pelayaran dan tempat berlabuhnya kapal, pelayanan pemanduan dan penundaan kapal saat keluar masuk pelabuhan, serta penyediaan fasilitas sandar kapal dan kegiatan bongkar muat komoditas curah kering, baik pangan maupun nonpangan, sesuai dengan jenisnya. Proses pembongkaran

barang tersebut tentunya memerlukan bantuan alat pengangkut yang mampu memindahkan muatan dari kapal menuju ke truk pengangkut atau sebaliknya. Alat tersebut bernama *Gantry Luffing Crane* (GLC), alat tersebut merupakan suatu alat berat yang berbentuk seperti crane kapal yang di gunakan untuk memindahkan benda seperti box kontainer atau bahan curah dari kapal. PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten ini merupakan pelabuhan non peti kemas yang artinya pada perusahaan tersebut hanya menyediakan jasa bongkar muat barang curah seperti gandum, garam. Selain itu, ada juga barang-barang konstruksi dan hasil pertambangan seperti batu bara.

Demi menunjang kelancara dari kinerja alat tersebut, tentunya tidak terlepas dari perawatan mesin beserta komponen-komponen pada alat tersebut. Orang yang bertugas melakukan hal tersebut tentunya para karyawan yang sudah ditempatkan pada bagian tersebut yaitu bagian *maintenance*. Bagian *maintenance* merupakan bagian yang bertugas menjaga dan merawat kondisi alat/mesin pabrik, memperbaiki atau melakukan penyesuaian mesin agar memperoleh proses produksi yang direncanakan [6]. Maintenance pada mesin GLC yang ada di PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten merupakan kegiatan yang dilakukan di dermaga. Kegiatan tersebut dilakukan setiap hari oleh para karyawan dengan di bantu alat-alat pendukung dalam pekerjaan tersebut. Semua jenis pekerjaan pastinya memiliki risiko bahaya dengan tingkatan masing-masing termasuk pekerjaan pada bagian *maintenance*. Kecelakaan di tempat kerja atau penyakit yang disebabkan oleh pekerjaan bisa terjadi disebabkan oleh kurangnya pemahaman tentang sumber-sumber risiko, pada akhirnya hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya kondisi dan tindakan tidak aman sehingga proses pekerjaan berjalan tidak sesuai dengan yang diinginkan [7].

Dari permasalahan di atas, penelitian bertujuan untuk mengenali ancaman bahaya, mengevaluasi risiko, dan mengatur risiko yang terkait dengan bahaya di PT Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten dengan menggunakan metode HIRADC. Dari penelitian tersebut diharapkan kecelakaan kerja dapat diminimalisir dan dapat memberikan informasi serta evaluasi untuk kedepannya.

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian ini menerapkan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian Deskriptif. Penelitian kualitatif jenis penelitian yang dilaksanakan dalam situasi alami, berinteraksi

langsung dengan sumber data, di mana peneliti berperan sebagai instrumen kecil yang menyajikan informasi dalam bentuk kata-kata atau gambar, bukan dalam bentuk angka [8]. Data dalam penelitian ini diambil dari observasi langsung selama proses pelaksanaan penelitian yaitu satu bulan. Kemudian, data tersebut dianalisa dengan menerapkan Metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assesment, and Determine Control*).

1. Identifikasi Potensi Bahaya (*Hazard Identification*)

Identifikasi bahaya adalah Langkah pertama dalam pengelolaan risiko. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan bahaya yang dapat muncul dalam setiap aktivitas pekerjaan [9]. Pada proses ini, data yang diperoleh dari observasi pada saat di dermaga tepatnya pada mesin GLC merupakan sumber utama untuk dilakukan proses identifikasi bahaya, yang diterapkan untuk menghindari dan mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja bagi karyawan di bagian pemeliharaan, yang dimana di setiap harinya mereka melakukan perawatan pada mesin GLC yng terletak di dermaga.

2. Penilaian Risiko (*Risk Assesment*)

Penilaian risiko merupakan proses yang dijalankan untuk menentukan pengutamaan dalam pengelolaan evaluasi risiko dan mengurutkan prioritas pengendalian berdasarkan seberapa besar risiko kecelakaan atau penyakit yang diakibatkan oleh pekerjaan [10]. Risiko merupakan kemungkinan terjadinya suatu peristiwa yang dapat memengaruhi suatu entitas. Penilaian risiko dilakukan dengan mempertimbangkan kemungkinan terjadinya kejadian dan tingkat dampak yang ditimbulkan dari kejadian tersebut. Metode kualitatif untuk bagian penilaian risiko disini mengacu kepada standar AS/NZS 4360-2004.

$$NR = Likelihood (L) \times Severity (S).(1)$$

Keterangan:

NR = Nilai Risiko

L = *Likelihood*

S = *Severity*

Tabel 1 Ukuran Kualitatif *Likelihood* pada Standar AS/NZS 4360-2004

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
A	<i>Almost Certain</i>	Dapat terjadi setiap saat
B	<i>Likely</i>	Sering terjadi
C	<i>Possible</i>	Dapat terjadi sekali-sekali
D	<i>Unlikely</i>	Jarang terjadi

Tabel 2 Ukuran Kualitatif Keparahan (*Severity*) berdasarkan Standar AS/NZS 4360-2004

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
1	<i>Insignificant</i>	Tidak menimbulkan cedera dan hanya menyebabkan kerugian finansial yang sangat kecil.
2	<i>Minor</i>	Mengakibatkan cedera ringan dengan kerugian finansial pada tingkat sedang.
3	<i>Moderate</i>	Menyebabkan cedera sedang yang memerlukan penanganan medis serta menimbulkan kerugian finansial yang cukup besar.
4	<i>Major</i>	Mengakibatkan cedera berat pada satu orang atau lebih, disertai kerugian besar dan terganggunya proses produksi.
5	<i>Catastropic</i>	Menyebabkan korban jiwa (minimal satu orang), kerugian yang sangat besar dengan dampak luas, serta menghentikan seluruh kegiatan operasional.

Tabel 3 Skala Pengukuran Kemungkinan (*Likelihood*)

Level	Tingkat Kemungkinan	Definisi
1	Sangat Jarang	Kecelakaan terjadi sekitar sekali dalam lima tahun.
2	Jarang	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 2-5 tahun.
3	Mungkin Terjadi	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 1-2 tahun.
4	Sering	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 2-10 bulan.
5	Hampir Pasti	Kecelakaan terjadi sekitar satu kali setiap bulan.

Tabel 4 Ukuran Kualitatif *Likelihood* pada Standar AS/NZS 4360-2004

Level	Tingkat Keparahan	Deskripsi
1	Tidak Signifikan	Tidak menimbulkan dampak atau dampaknya sangat kecil terhadap manusia, proses produksi, maupun properti,

Level	Tingkat Keparahan	Deskripsi
2	Kecil	serta hanya memerlukan perawatan fisik singkat (± 15 menit). Menyebabkan cedera ringan yang dapat ditangani oleh tim P3K dan/atau mengakibatkan kehilangan waktu kerja maksimal satu hari.
3	Sedang	Menimbulkan cedera tingkat sedang yang memerlukan penanganan medis serta menyebabkan kehilangan waktu kerja sedikitnya dua hari.
4	Besar	Mengakibatkan cedera berat yang membutuhkan perawatan di rumah sakit dan/atau menyebabkan kehilangan waktu kerja lebih dari dua hari.
5	Bencana	Dampak yang ditimbulkan menyebabkan kecacatan permanen, baik sebagian maupun total, atau bahkan kematian.

Tabel 5 Skala Risk Rating pada Standar AS/NZS 4360-2004

Kemungkinan	Keparahan (Severity)				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Keterangan:

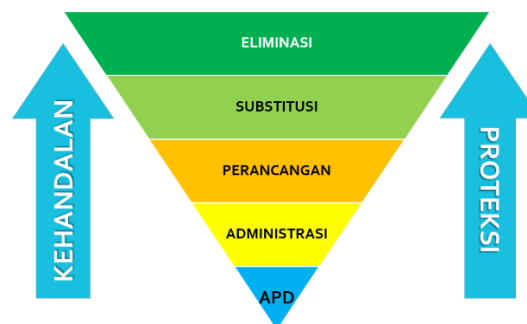
Low : 1-4 Hijau

Sedang : 5-10 Kuning

Tinggi : 12-25 Merah

3. Pengendalian Risiko (*Determine Control*)

Kemudian dilanjutkan proses pengendalian risiko dengan memperhatikan hasil penilaian risiko yang sudah didapatkan. Pengendalian tersebut dilakukan dengan memperhatikan hierarki dari pengendalian risiko yang dimulai dari yang tertinggi hingga yang terendah dengan tujuan untuk mengurangi risiko seefektif mungkin dengan cara yang permanen dan andal [11]. Terdapat lima tahapan dalam pengendalian risiko sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 7 Hirarki Pengendalian Risiko

Pengendalian risiko terbagi menjadi beberapa bagian yaitu eliminasi, substitusi, perancangan/rekayasa teknis, administrasi, dan APD. Eliminasi merupakan teknik pengendalian risiko dengan cara menghilangkan atau mengurangi pekerjaan, alat proses, mesin, dan substansi yang dapat menimbulkan bahaya untuk melindungi para pekerja. Substansi merupakan pengendalian yang dilakukan dengan cara melakukan pekerjaan yang sama namun dengan mengurangi risiko bahaya yang ada. Perancangan/rekayasa teknis merupakan pengendalian yang dilakukan dengan cara memberikan tambahan peralatan dan perbaikan alat yang dapat menunjang keselamatan pekerja. Administrasi merupakan pengendalian risiko yang dilakukan dengan cara membuat peraturan, peringatan, rambu-rambu, prosedur instruksi kerja, dsb. Terakhir yaitu pengendalian dengan cara memberikan APD, pengendalian ini dilakukan dengan cara memberikan atau menginstruksikan kepada semua pekerja untuk menggunakan APD yang sesuai dengan jenis pekerjaannya agar dapat melindungi diri dari risiko pekerjaannya [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukannya penilaian risiko bahaya dengan menggunakan metode HIRADC pada kegiatan *maintenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok cabang Banten. Terdapat 5 jenis pekerjaan yang menjadi fokus pada penelitian ini dan kelima pekerjaan tersebut merupakan bagian dari *maintenance* mesin GLC diantaranya pengelasan grabs, perawatan mesin bakar, pembersihan ruang kelistrikan, pelumasan, dan *preventif maintenance*.

Identifikasi Potensi Bahaya

Proses ini dilakukan dengan cara melakukan observasi selama penelitian untuk mengidentifikasi aspek pekerjaan yang berpotensi menimbulkan bahaya dan kecelakaan kerja dalam kegiatan *maintenance* dapat berasal dari lingkungan

kerja, peralatan yang digunakan, serta bahan yang terkait dengan pekerjaan tersebut. Berikut ini tabel data mengenai identifikasi potensi bahaya.

Table 6 Data Identifikasi Bahaya Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

Lokasi	Pekerjaan /Kegiatan/ Aktivitas/ Fasilitas	Bahaya & Risiko	
		Bahaya	Risiko
Dermaga B (Mesin GLC)	Pengelasan Komponen Mesin GLC (Grabs)	Percikan api	Cedera fisik
	perawatan pada ruang mesin bakar	Asap Pengelasan	Iritasi Mata
		Terjepit atau terhimpit	Cidera fisik
	Pembersihan ruang kelistrikan	Kebocoran fluida bertekanan	Luka pada kulit
		Tegangan tinggi	Kematian
	Pemberian pelumasan pada komponen (<i>wire roo</i>)	Terjepit atau terhimpit	Cidera fisik
		bekerja di ketinggian	Terjatuh, patah tulang, dan kematian
Preventif <i>Minetenance</i> 2 (PM2)	Kebocoran fluida	Cidera fisik akibat terjatuh karena licin	

Selama pelaksanaan penelitian, terdapat lima pekerjaan *maintenance* pada mesin GLC di dermaga B. Semua pekerjaan yang dilakukan pastinya memiliki bahaya dan risiko masing-masing. Seperti pada pekerjaan pengelasan komponen mesin GLC (Grabs), terdapat bahaya berupa percikan api dan asap pengelasan yang dapat menimbulkan risiko cedera fisik dan iritasi mata. Kemudian, saat melakukan perawatan pada ruang mesin bakar, pekerja berisiko terjepit atau terhimpit serta mengalami luka pada kulit akibat kebocoran fluida bertekanan. Pekerjaan pembersihan ruang kelistrikan juga tidak kalah berbahaya karena melibatkan tegangan tinggi yang bisa menyebabkan risiko kematian.

Pada kegiatan pemberian pelumasan pada komponen seperti *wire roop*, terdapat bahaya terjepit atau terhimpit serta risiko terjatuh saat bekerja di ketinggian yang dapat menyebabkan patah tulang

atau bahkan kematian. Sedangkan dalam pekerjaan *preventif maintenance* 2 (PM2), bahaya kebocoran fluida dapat menimbulkan risiko cedera fisik akibat terjatuh karena permukaan yang licin. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperhatikan prosedur keselamatan kerja dan menggunakan alat pelindung diri (APD) yang sesuai pada setiap jenis pekerjaan tersebut.

Hasil Penilaian Risiko

Pada langkah selanjutnya dilakukan *Risk Assessment* terhadap setiap potensi bahaya yang dapat ditimbulkan dari pekerjaan *minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok. Hasil penilaian tersebut didapatkan dari proses wawancara dengan bagian K3 di perusahaan tersebut. Data yang diperoleh terdapat pada tabel berikut.

Table 7 Data Penilaian Risiko Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

No	Bahaya	Penilaian Risiko			
		<i>Likelihood</i> (L)	<i>Severity</i> (S)	Nilai Risiko	Level Risiko
1.	Percikan api	3	2	6	Medium
2.	Asap Pengelasan Terjepit	2	1	2	Low
3.	atau terhimpit	1	3	3	Low
4.	Kebocoran fluida bertekanan	2	2	4	Low
5.	Kebocoran fluida	2	2	4	Low
6.	Tegangan tinggi	2	4	8	Medium
7.	Bekerja di ketinggian	3	4	12	High

Pengendalian Bahaya

Berikut merupakan pengendalian bahaya yang dilakukan mulai dari kategori rendah hingga tinggi. Rekomendasi pengendalian ini diberikan dengan tujuan untuk mengurangi potensi bahaya yang ditimbulkan dari proses pekerjaan baik dari lokasi maupun dari kondisi setiap pekerjaanya. Rekomendasi pengendalian bahaya ditampilkan pada tabel berikut.

Table 8. Pengendalian Bahaya Pada Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

Bahaya & Risiko		Level Risiko	Pengendalian
Bahaya	Risiko	Risiko	
Percikan api	Cedera fisik	Medium	<p><i>Engineering:</i> Memasang tirai las (<i>welding screen</i>) untuk menahan percikan api.</p> <p>Administrasi: Memberikan pelatihan keselamatan kerja pengelasan.</p> <p>APD: Menggunakan helm las, kacamata pelindung, sarung tangan tahan panas, masker respirator, dan pakaian pelindung.</p>
Asap Pengelasan	Iritasi Mata	Low	<p><i>Engineering:</i> Memasang ventilasi lokal (<i>exhaust fan</i>) atau sistem penyedot asap.</p> <p>Administrasi: Membatasi durasi paparan dan melakukan rotasi kerja.</p> <p>APD: Menggunakan helm las dan masker respirator.</p>
Terjepit atau terhimpit	Cedera fisik	Low	<p><i>Engineering:</i> Memasang pelindung mesin (<i>machine guard</i>) pada bagian bergerak.</p> <p>Administrasi: Membuat SOP penggunaan mesin dan</p>

Bahaya & Risiko		Level Risiko	Pengendalian
Bahaya	Risiko	Risiko	
			<p>pelatihan operator.</p> <p>APD: Menggunakan sarung tangan, pakaian pelindung, dan sepatu safety.</p>
Kebocoran fluida	Luka pada bertekan kulit	Low	<p><i>Engineering:</i> Melakukan perawatan dan inspeksi rutin pada sistem perpipaan.</p> <p>Administrasi: Menyusun SOP penanganan kebocoran fluida.</p> <p>APD: Menggunakan sarung tangan tahan panas, kacamata pelindung, dan pakaian pelindung.</p>
Kebocoran fluida	Cidera fisik akibat terjatuh karena licin	Low	<p><i>Engineering:</i> Memperbaiki sistem drainase dan memastikan lantai tidak licin.</p> <p>Administrasi: Membersihkan tumpahan segera dan memasang rambu peringatan.</p> <p>APD: Menggunakan sepatu safety anti slip.</p>
Tegangan tinggi	Kematian	High	<p><i>Engineering:</i> Memasang sistem grounding dan pelindung panel listrik.</p> <p>Administrasi:</p>

Bahaya & Risiko		Level Risiko	Pengendalian
Bahaya	Risiko		
			Menerapkan prosedur LOTO (<i>Lock Out Tag Out</i>) dan inspeksi rutin.
			APD: Menggunakan sarung tangan isolasi, sepatu safety isolator, dan pakaian tahan listrik.
Bekerja di ketinggian	Terjatuh, patah tulang, dan kematian	High	Engineering: Memasang guardrail, jaring pengaman, dan lifeline serta menyediakan platform kerja yang stabil.
			Administrasi: Menerapkan buddy system dan pelatihan kerja di ketinggian serta simulasi penyelamatan.
			APD: Menggunakan full body harness, helm safety dengan chinstrap, sepatu anti slip, dan sarung tangan.

Berdasarkan Tabel 7 dan 8 identifikasi bahaya dan penilaian risiko pada pekerjaan di Dermaga B menunjukkan adanya variasi tingkat risiko dari rendah hingga tinggi pada beberapa jenis pekerjaan.

Pada pekerjaan pengelasan, potensi bahaya berupa percikan api dan asap pengelasan memiliki tingkat risiko sedang dan rendah. Percikan api dikategorikan sedang karena cukup sering terjadi dan dapat menyebabkan cedera fisik, sedangkan asap pengelasan tergolong rendah karena dampaknya relatif ringan seperti iritasi mata. Pengendalian yang diterapkan sudah mencakup rekayasa teknik (tirai las dan ventilasi), administrasi

(pelatihan dan pembatasan paparan), serta APD, sehingga secara umum cukup efektif, namun tetap memerlukan konsistensi penerapan di lapangan.

Pada pengoperasian mesin, bahaya terjepit atau terhimpit memiliki tingkat risiko rendah karena kemungkinan kejadian jarang, meskipun dampaknya dapat menyebabkan cedera fisik. Pengendalian yang dilakukan melalui pemasangan pelindung mesin, SOP kerja, serta penggunaan APD sudah sesuai dengan hirarki pengendalian. Efektivitasnya cukup baik, tetapi sangat bergantung pada kepatuhan operator dalam mengikuti prosedur kerja yang telah ditetapkan.

Pada pekerjaan penanganan fluida, risiko berasal dari kebocoran fluida bertekanan dan lantai licin yang sama-sama berada pada kategori rendah. Hal ini disebabkan oleh tingkat kemungkinan dan dampak yang relatif sedang. Pengendalian melalui perawatan sistem perpipaan, perbaikan drainase, serta SOP penanganan tumpahan sudah cukup efektif, ditambah dengan penggunaan APD sebagai perlindungan tambahan, namun tetap memerlukan pengawasan rutin agar kondisi kerja tetap aman.

Pada pekerjaan instalasi listrik, bahaya tegangan tinggi memiliki tingkat risiko tinggi karena dampaknya sangat fatal meskipun kemungkinan kejadiannya tidak terlalu sering. Pengendalian yang diterapkan seperti sistem grounding, pelindung panel, prosedur *Lockout-Tagout* (LOTO), serta penggunaan APD sudah cukup komprehensif. Namun, efektivitasnya sangat ditentukan oleh kedisiplinan pekerja dalam menerapkan prosedur keselamatan secara konsisten.

Pekerjaan di ketinggian memiliki tingkat risiko tinggi karena kombinasi antara kemungkinan kejadian yang cukup sering dan dampak yang sangat fatal seperti jatuh dari ketinggian. Pengendalian yang dilakukan sudah lengkap meliputi rekayasa teknik (*guardrail* dan *lifeline*), administrasi (*buddy system* dan pelatihan), serta penggunaan APD (*full body harness*). Meskipun demikian, efektivitas pengendalian sangat bergantung pada pengawasan dan kepatuhan pekerja dalam menjalankan prosedur keselamatan.

KESIMPULAN

Berdasarkan temuan dari pengidentifikasian serta evaluasi risiko dengan menerapkan metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control*) terhadap lima jenis pekerjaan *maintenance* mesin GLC di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok cabang Banten, ditemukan berbagai potensi bahaya yang memiliki tingkat risiko berbeda-beda, mulai dari kategori rendah (*low*), sedang (*medium*), hingga tinggi (*high*).

Sebagian besar potensi bahaya yang ada terklasifikasi dalam kelompok risiko rendah, seperti iritasi mata akibat asap pengelasan, cedera fisik akibat terjepit atau terhimpit, serta cedera karena kebocoran fluida. Meskipun termasuk kategori rendah, bahaya ini tetap memerlukan pengendalian melalui penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) serta kepatuhan terhadap Standar Operasional Prosedur (SOP) yang aman.

Risiko dengan kategori sedang ditemukan pada bahaya percikan api dan tegangan tinggi, yang dapat menimbulkan cedera serius hingga kematian. Hal ini menegaskan pentingnya pengendalian administratif seperti pelatihan K3 serta pengendalian teknis seperti penerapan sistem *Lockout-Tagout* (LOTO). Bahaya dengan tingkat risiko tinggi berasal dari pekerjaan bekerja di ketinggian, yang dapat menyebabkan kecelakaan fatal seperti patah tulang dan kematian. Untuk itu, diperlukan upaya pengendalian yang komprehensif, meliputi pendekatan engineering, administratif, dan penggunaan APD lengkap seperti *full body harness*, helm safety dengan chinstrap, dan sepatu anti-slip.

Secara keseluruhan, hasil penilaian risiko ini menunjukkan pentingnya penerapan sistem keselamatan kerja yang baik, pengawasan rutin, serta edukasi berkelanjutan kepada seluruh pekerja. Dengan pengendalian risiko yang tepat, diharapkan kecelakaan kerja dapat dicegah dan keselamatan serta kesehatan kerja (K3) di lingkungan dermaga dapat terjaga secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Trisiana, S. A. Y. Dwi, and R. Anik, "Assessment Risiko Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) Menurut Variabel OHSAS Dengan Menggunakan HAZOP (Hazard And Operability Study) dan HIRADC (Hazard Identification Risk Assesment end Determining Control (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Ciputra World Ph)," *Pengaruh Ter. Psikoedukasi Kel. Terhadap Tingkat Kecemasan Kel. pada Anggota Kel. yang Menderita Katakan di Wil. Kerja Puskesmas Jelbuk Kabupaten Jember*, vol. 3, pp. 28–37, 2019.
- [2] B. Ketenagakerjaan, "Jumlah Kasus Kecelakaan Kerja di Indonesia Menurut Provinsi dan Segmen Kepesertaan Bulan Mei Tahun 2023." 2023.
- [3] D. S. Urrohmah and D. Riandadari, "Identifikasi Bahaya dengan Metode HIRARC dalam Upaya Memperkecil Risiko Kecelakaan Kerja di PT . PAL Indonesia," *J. Tek. Mesin UNESA*, vol. 08, no. 01, pp. 34–40, 2019.
- [4] Dea Artha Melati, Ekowati Retnaningtyas, and Diniyah Kholidah, "Analisis Tingkat Pengetahuan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Mengenai Lockout/Tagout (LOTO) terhadap Tindakan Tidak Aman (Unsafe Action) dalam Lockout/Tagout (LOTO) Pekerja Divisi Manufactur dan Divisi Enggenering pada PT. X Kabupaten Banyuwangi," *Detect. J. Inov. Ris. Ilmu Kesehat.*, vol. 2, no. 3, pp. 99–108, 2024, doi: 10.55606/detector.v2i3.4149.
- [5] M. I. Pasaribu, D. A. A. Ritonga, and A. Irwan, "Analisis Perawatan (*Maintenance*) Mesin Screw Press Di Pabrik Kelapa Sawit Dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (Fmea) Di Pt. Xyz," *Jitekh*, vol. 9, no. 2, pp. 104–110, 2021, doi: 10.35447/jitekh.v9i2.432.
- [6] R. M. Zein, M. Jufriyanto, and Y. Pandu, "Manjemen Risiko Pada Proses Produksi Tanki Air: Metode Hazard Identification Risk Assessment Risk Control (HIRARC)," *Gn. Malang, Randu Agung, Kec. Kebomas. Kab. Gresik*, vol. 19, no. 2, p. 61121, 2022.
- [7] R. Safrudin, Zulfamanna, M. Kustati, and N. Sepriyanti, "Penelitian Kualitatif," *J. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–15, 2023.
- [8] Restu and F. Yuamita, "Analisis Risiko Potensi Kecelakaan Kerja Pada Pekerja Departemen Persiapan Produksi Menggunakan Metode HIRADC (Hazard Identification, Risk Assesment And Determining Control)," *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Terap.*, vol. 2, no. 3, pp. 159–167, 2023, doi: 10.55826/tmit.v2i3.63.
- [9] S. Santoso, "Penerapan Metode Hiradc Sebagai Upaya Pencegahan Risiko Kecelakaan Kerja Pada Divisi Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap," *J. Bisnis Manaj.*, vol. 20, pp. 41–64, 2020.
- [10] T. Ihsan, S. A. Hamidi, and F. A. Putri, "Penilaian Risiko dengan Metode HIRADC Pada Pekerjaan Konstruksi Gedung Kebudayaan Sumatera Barat," *J. Civronlit Unbari*, vol. 5, no. 2, p. 67, 2020, doi: 10.33087/civronlit.v5i2.67.
- [11] T. Saputro and D. Lombardo, "Metode Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control (HIRADC) Dalam Mengendalikan Risiko Di PT. Zae Elang

- Perkasa,” *J. Baut Dan Manufaktur*, vol. 03, no. 1, pp. 23–29, 20216.
- [12] T. Sukwika, “Analisis Manajemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode HIRADC pada Departemen Assembly Listrik,” *J. Appl. Manag. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 119–127, 2021.
- [13] Y. Atiyah and E. K. Wibowo, “Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Pegawai Saat Pandemi Covid-19 di Rumah Sakit Jantung dan Pembuluh Darah Harapan Kita,” *J. Sumber Daya Apar.*, pp. 61–81, 2023.

EVALUATION STUDY ON PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER – 4000 IN CENTRAL PROCESSING AREA PT. PERTAMINA EP ASSET 4 SUKOWATI FIELD

Izal Daffa Rizqullah¹, Dimas Ilham Akbar¹, Amma Muzayyin¹, Wiliandi Saputro², Ardika Nurmawati¹, Erwan Adi Saputro^{1*}

¹ Chemical Engineering Department, Engineering and Sains Faculty, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya, Indonesia 60294

² Mechanical Engineering Department, Engineering and Sains Faculty, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya, Indonesia 60294

Jl. Rungkut Madya, Gn. Anyar, Kec. Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur 60294

erwanadi.tk@upnjatim.ac.id¹

Abstract

PT Pertamina EP Asset 4 is one of Pertamina's subsidiaries operating in the oil and gas industry. In its production process, PT Pertamina EP Asset 4 requires heat exchangers for various purposes. Impurities on the shell and tube walls is unavoidable, which, if left unchecked, will disrupt the efficiency of the heat exchanger. These impurities accumulate over time and hinder the heat exchanger's efficiency due to debris adhering to the shell and tube surfaces. Therefore, this calculation is aimed at determining the heat transfer efficiency during industrial processes. Heat efficiency, which describes the ratio of heat transferred from a high-temperature fluid (water) to a low-temperature fluid (oil) per unit of time, is a crucial metric for evaluating the effectiveness of the heat exchanger. The research findings show that the overall net coefficient (U_c) and overall design average coefficient (U_d) are recorded at 88.2422 Btu/ft².hr.°F and 51.7160 Btu/ft².hr.°F, respectively. Meanwhile, the fouling factor (R_d) is assessed at 0.0079 ft².hr.°F/Btu. Based on the significant difference between U_c and U_d as well as the high R_d value, it can be concluded that the heat exchanger unit has experienced considerable fouling, necessitating a special mechanical cleaning to restore its performance.

Key words : heat efficiency, heat exchanger, shell and tube.

INTRODUCTION

PT. Pertamina EP Asset 4 is a subsidiary of Pertamina specializing in the upstream sector of the oil and gas industry, encompassing exploration and exploitation activities. It was established on September 13, 2005. Subsequent to the establishment of PT. Pertamina EP, PT Pertamina (Persero) entered into a Cooperation Contract (KKS) with BPMIGAS (now SKKMIGAS) on September 17, 2005. This contract, which retroactively came into effect on September 17, 2003, grants authority over the entire Oil and Gas Mining sector delegated through legislation outlined in Law Number 22 of 2001 concerning Oil and Gas [1]. A heat transfer device is deemed effective in its application when it meets certain criteria, particularly the capability to transfer heat as required by the operational process within a fouling factor or R_d . Typically, the dirt factor of a heat exchanger is assessed over several periods. As this period elapses, the Heat Exchanger may struggle to operate efficiently due to contaminants accumulating on the shell and tube walls. To prevent this, periodic shutdowns and cleaning of the Heat Exchanger are necessary. R_d

represents the maximum impact of dirt accumulation on the exterior of the shell and the interior of the tube walls, which, if left uncleaned, diminishes the heat transfer capacity [2]. Heat exchangers operate based on three fundamental modes of heat transfer: conduction, convection, and, in some cases, radiation. In shell and tube heat exchangers, conduction primarily occurs through the tube wall material, while convection dominates the heat exchange between the fluids and the tube surfaces. The performance of a heat exchanger depends largely on the overall heat transfer coefficient (U), which is influenced by the material thermal conductivity, fluid velocity, and the degree of surface cleanliness. The shell and tube type typically consists of a bundle of tubes enclosed within a cylindrical shell, where one fluid flows through the tubes and another fluid passes over the tubes within the shell side. Baffles are commonly installed to enhance turbulence and improve heat transfer efficiency by increasing the fluid mixing on the shell side.

The thermal design of a shell and tube heat exchanger aims to achieve a high rate of heat transfer while maintaining a reasonable pressure drop on both fluid sides. Key parameters influencing

its performance include the tube arrangement (triangular or square pitch), flow configuration (counter-flow, parallel-flow, or cross-flow), and the number of passes through the tubes. Among these, the counter-flow configuration generally offers the best thermal performance, as it maintains a higher mean temperature difference between fluids along the exchanger length. In industrial applications, however, the actual performance often deviates from design expectations due to fouling, corrosion, and partial blockage within the tubes or shell passages.

Fouling, defined as the accumulation of unwanted materials on heat transfer surfaces, can originate from multiple sources such as crystallization of salts, corrosion products, biological growth, or particulate deposition. Each fouling type contributes differently to thermal resistance and pressure loss. In hydrocarbon systems, especially in crude oil processing, the most common fouling issues arise from asphaltene and wax deposition, which can form hard layers on tube walls and significantly lower the overall heat transfer coefficient (U). The relationship between fouling and efficiency degradation is nonlinear, meaning even a small fouling layer can cause a substantial reduction in thermal performance.

Heat exchangers are increasingly being utilized in a variety of sectors to reduce and raise temperatures in order to fulfill the technical requirements of different goods. Chemical plants, factories, office buildings, hospitals, and power plants are among the industries that employ heat exchangers [3]. In the oil and gas industry, heat exchangers are essential equipment for temperature regulation in processes such as crude oil stabilization, gas dehydration, and produced water treatment. Maintaining high thermal efficiency directly impacts the operational cost and safety of these processes. A decrease in heat transfer efficiency results in increased fuel consumption, production downtime, and potential operational hazards due to temperature deviations. Therefore, a periodic performance evaluation is crucial to ensure the exchanger continues to meet design expectations while minimizing energy losses. In the operational environment of Central Processing Areas (CPA), where crude oil and produced water are continuously processed, maintaining the heat exchanger's reliability is a crucial part of asset integrity management. Thermal inefficiencies not only lead to increased fuel consumption but can also disrupt separation efficiency in downstream units such as three-phase separators and dehydrators. Hence, predictive maintenance and periodic thermal performance assessments have become an integral practice in petroleum operations. The evaluation of fouling tendencies under real operating data, such as temperature and flow rate variations, provides

valuable insights into the actual condition of the exchanger and helps determine the optimal cleaning intervals.

Furthermore, modern performance evaluations increasingly integrate computational methods such as process simulation or data-driven monitoring using digital twins. However, such systems must still rely on accurate field measurements to validate models. Thus, analytical evaluations—like those performed in this study—remain a vital step for ensuring operational safety and maintaining heat transfer performance within design specifications.

According to [4], the efficacy of the shell and tube of the Heat Exchanger with the COG Booster system was 37.4%. According to [5], the effectiveness value obtained on shell and tube of Heat Exchangers utilizing four baffles is 43%. The efficacy value found in the study by [6] on the Heat Exchanger with the Kern technique was 76.0613%. The Heat Exchanger then received a 47.77% efficacy rating in research conducted by [7]. In research done by [8], the efficacy of a shell and tube heat exchanger with baffles 15 cm apart was 82.13%. Whereas according to studies done by [9], the efficacy value for the shell and tube Heat Exchanger type BEM is 70%. The previous studies demonstrate a wide variation in efficiency among different shell and tube configurations, depending on baffle spacing, flow arrangement, and fouling accumulation. However, limited research has specifically addressed the performance of field-operated heat exchangers under real production conditions, particularly in upstream oil facilities. This research fills that gap by providing an in-depth evaluation of the HE-4000 unit operating in the Central Processing Area (CPA) of PT Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field. The findings are expected to serve as a reference for optimizing maintenance intervals and improving operational reliability. Given the high operating temperature and the multiphase nature of crude oil streams, the HE-4000 heat exchanger is particularly vulnerable to fouling and scaling over extended operation periods. Factors such as variable crude composition, water cut, and intermittent shutdowns can accelerate fouling formation, resulting in a reduced effective heat transfer area. Therefore, continuous monitoring of temperature differentials between the shell and tube sides is essential for early detection of performance deterioration. Evaluating the actual fouling factor (R_d) relative to its design value enables engineers to determine whether the exchanger still operates within acceptable limits or requires immediate cleaning actions.

There is just one heat exchanger at CPA (Central Processing Area) PT. Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field. The HE-4000 (Heat Exchanger

4000) receives crude oil and water from the well and functions as a heater to warm up the crude oil before it undergoes the FSO (Floating, Storage, and Offloading) process, preventing the product from gelling when transported from CPA to FSO. The type of heat exchanger used is Shell and Tube. The benefits of shell and tube Heat Exchanger are that the pressure drop can be varied according to the capacity of the heat exchanger, and maintenance is relatively easier because it can be dismantled and assembled [10].

The purpose of the study was to evaluate the performance of the Heat Exchanger (E-4000 in Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field).

MATERIAL AND METHODS

Metode Data collection is needed to evaluate the heat exchanger (E – 4000). The evaluation process involves both field data collection and analytical calculations. The performance of a heat exchanger can be assessed by comparing its actual thermal behavior to the design parameters. In this study, the analysis focuses on quantifying the extent of fouling accumulation through thermal resistance calculations. Therefore, the measured parameters include inlet and outlet temperatures of both fluids, flow rates, and the corresponding operating pressure on each side. These data were obtained directly from the CPA control system logs and daily operation records to ensure that they represent normal operating conditions. The data utilized is the heat exchanger (E – 4000) work data from August 17, 2021 to August 23, 2021. This information will subsequently be used to determine the Dirt Factor (R_d). Following the collection of these data, it is possible to determine whether or not the heat exchanger needs to be cleaned. All processes are represented using flow charts, which is meant to clarify the processes to be performed, to decision making from problem formulation. The flowchart illustrates the overall sequence of the analytical evaluation, starting from data acquisition, preprocessing, calculation of thermal parameters, and interpretation of results. The steps were carried out systematically using spreadsheet-based computation for efficiency and transparency.

The HE-4000 unit is a horizontal shell and tube heat exchanger installed at the Central Processing Area (CPA) of the Sukowati Field. The unit operates under continuous oil-water processing with water as the cooling medium in the tube side and crude oil as the hot fluid in the shell side. It is designed to prevent crude oil solidification during transfer to the Floating Storage and Offloading (FSO) facility. The heat exchanger is equipped with

a removable tube bundle, enabling periodic mechanical cleaning when fouling exceeds design limits.

This design configuration makes it representative of typical field units used in upstream oil production, where both reliability and maintainability are key performance indicators.

Table 1 Tube and shell temperature

Date	TUBE (WATER)		SHELL (OIL)	
	IN (°F)	OUT (°F)	IN (°F)	OUT (°F)
17/08/2021	219	216	117	150
18/08/2021	221	218	116	150
19/08/2021	223	219	116	149
20/08/2021	222	219	119	150
21/08/2021	223	220	117	148
22/08/2021	222	218	117	151
23/08/2021	222	219	118	150

Table 2. Tube and shell flow rate

Date	TUBE (WATER) FLOW RATE (BWPDP)	SHELL (OIL) FLOW RATE (BOPD)
17/08/2021	35400	4306
18/08/2021	35400	4172
19/08/2021	35900	4124
20/08/2021	35200	4204
21/08/2021	36300	4135
22/08/2021	36500	4110
23/08/2021	36500	4175

The monitoring period was selected to represent a stable production window without any planned shutdowns, ensuring that the operating data reflected steady-state behavior. The data were then validated through cross-checking with historical averages to minimize anomalies caused by sensor drift or operational disturbances. The reliability of these data is essential because even a minor deviation in temperature readings can significantly affect the calculated heat transfer coefficient and fouling factor.

During the observation period, environmental conditions such as ambient temperature and cooling water temperature were relatively constant, with variations below $\pm 2^\circ\text{F}$. Such stability ensures that changes in thermal performance can be primarily attributed to fouling effects rather than external factors.

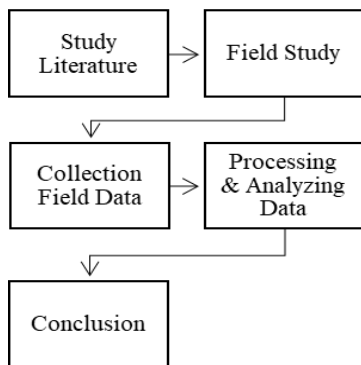


Figure 1. Research block diagram

RESULT AND DISCUSSION

Based on the results of data processing, The evaluation began by comparing the measured operating data with the heat exchanger design specifications. These comparisons provide insight into how closely the field operation aligns with expected thermal behavior. The recorded data include daily variations in temperature and flow rate for both fluids, which directly influence the rate of heat transfer. Before detailed calculations were conducted, the data were plotted to visualize temperature trends and to identify any anomalies that may indicate operational disturbances. The data acquired in the form of real data and heat exchanger design data (E-4000) are presented in the following graph:

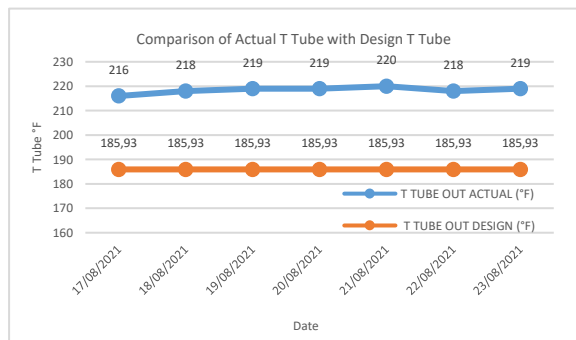


Figure 2 Comparison of actual T tube with design T tube

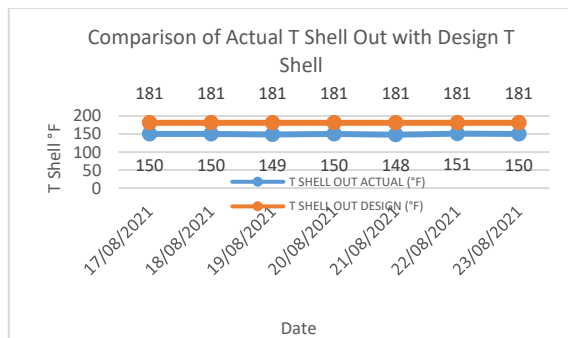


Figure 3 Comparison of actual T shell out with design T shell

As shown in Figure 2, the actual outlet temperature of the tube side (cooling water) exhibits a gradual decrease in comparison to the design value. This deviation suggests a reduced heat absorption capacity by the tube-side fluid, which may result from thermal resistance caused by fouling on the inner tube walls. Conversely, Figure 3 demonstrates that the shell-side outlet temperature (crude oil) remains slightly lower than design expectations, indicating that the intended heat delivery to the shell fluid is not fully achieved. The temperature difference between the shell and tube outlets (ΔT) can therefore serve as an indicator of the exchanger’s decreasing performance over time.

The average deviation in tube outlet temperature during the observation period was approximately 2–3°F below design, while the shell-side outlet temperature was 1–2°F below design. These differences, though small numerically, can significantly affect the overall heat transfer rate due to the high flow rate and large surface area involved. In heat exchanger systems, even a few degrees of reduction in temperature differential may correspond to several percent loss in thermal efficiency.

The data collected from the field were then calculated through the following equations, the calculation of Fouling Factor (Rd) from Overall Coefficient (Uc) based on the first equations (Kern,1965)

$$U_c = \frac{h_{to} + h_o}{h_{io} \times h_o} \dots\dots\dots(1)$$

- U_c = Clean overall Coefficient, btu/hr.ft².°F
- h_o = Shell heat transfer coefficient,, btu/hr.ft².°F
- h_{io} = tube heat transfer coefficient, btu/hr.ft².°F

Design Overall Coefficient (U_d) calculated from the equations below

$$U_d = \frac{q}{A \times \Delta T} \dots\dots\dots(2)$$

U_d = Overall Heat Transfer Coefficient, $\text{btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$

A = Total surface

From the equations (1) & (2) then the fouling factor (R_d) could be determined as follow:

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c \times U_d} \dots\dots\dots(3)$$

The calculation results show that the clean overall heat transfer coefficient (U_c) is considerably higher than the design overall coefficient (U_d). This indicates that the exchanger’s effective heat transfer area has been reduced by fouling layers. The fouling factor (R_d) acts as an additional thermal resistance in series with the metal wall and film resistances on both sides. As the thickness of the fouling layer increases, the overall heat transfer coefficient decreases exponentially.

In this study, the fouling factor reached an average value of $0.0079 \text{ ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$, which is significantly higher than the typical design range for shell-and-tube exchangers handling clean fluids (generally $0.001\text{--}0.002 \text{ ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$). Such high resistance values suggest substantial accumulation of deposits on the tube walls. The difference between U_c and U_d values also indicates a notable decline in heat transfer efficiency, approximately 40% below design performance.

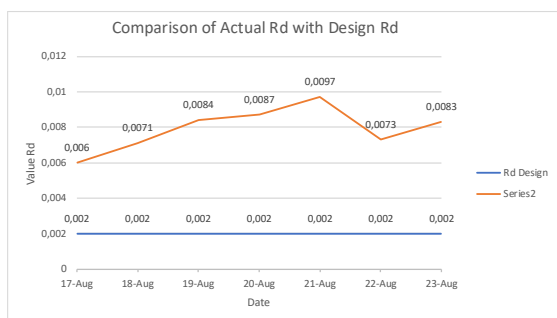


Figure 4. Comparison of actual R_d with design R_d

The temperature for the tube and shell output does not match the design temperature, as shown in figure 1 and 2 from August 17, 2021 to August 23, 2021. The discrepancy in temperatures is due to the heat exchanger's high fouling factor. Figure 3 shows that the actual fouling factor (R_d) is higher than the design fouling factor (R_d). This indicates that the heat exchanger's inner and outer tube walls have crust, resulting in less efficient heat transmission from the heat exchanger. As a result, cleaning the heat exchanger is required to lower the value of R_d and increase the efficiency of heat exchange once more.

Overall, the results indicate that the HE-4000 unit operates below its optimal efficiency due to fouling accumulation. The thermal resistance value obtained suggests that the exchanger should be

scheduled for mechanical cleaning within the next maintenance window. Implementing a predictive maintenance system based on continuous temperature and flow monitoring could prevent severe efficiency degradation. Furthermore, adjusting the cooling water flow rate or applying antifouling treatments may help delay the formation of deposits. These recommendations are expected to enhance the exchanger’s operational lifespan and energy efficiency.

In addition to maintenance optimization, future improvement efforts could also involve material selection and design modification. Using corrosion-resistant or low-fouling tube materials such as stainless steel or titanium can reduce the rate of deposit buildup and extend cleaning intervals. Incorporating surface enhancement techniques, such as coating or micro-grooved surfaces, may further improve heat transfer by promoting turbulence and minimizing fouling adhesion. Moreover, regular chemical cleaning using environmentally friendly descaling agents could be integrated into the maintenance schedule to complement mechanical cleaning methods.

From an operational standpoint, data-driven monitoring systems offer a promising approach to manage heat exchanger performance. By combining historical data with real-time analytics, operators can predict fouling trends and determine the most cost-effective maintenance intervals. This integration of conventional engineering analysis with digital monitoring technologies supports the broader goal of achieving energy efficiency and sustainability in petroleum processing facilities.

REFERENCES

By calculation, the heat exchanger E-4000 has a lower heat transfer than the design due to the inhibiting factors such as crust on the inner and outer tube walls. The computed R_d value between Agustus 17, 2021 and Agustus 23, 2021 is higher than the design R_d value, indicating that the heat exchanger requires cleaning. The E-4000 heat exchanger is still usable in August 2021, but it will need to be cleaned to reduce the actual fouling factor and increase the heat transfer efficiency. In addition, the higher fouling factor shows that deposits on the tube surface significantly decrease the overall heat transfer coefficient (U). This condition leads to reduced energy efficiency and limits the exchanger’s ability to achieve the desired outlet temperature for both shell and tube fluids. Regular maintenance and cleaning schedules are therefore needed to maintain performance close to design values. It is also recommended that performance monitoring be carried out periodically to detect early fouling

buildup, allowing corrective actions before severe efficiency loss occurs. The implementation of preventive measures—such as optimizing fluid velocity, maintaining stable operating conditions, and using appropriate antifouling chemicals—can further minimize fouling formation. By applying these strategies, the E-4000 unit is expected to operate more efficiently, extend its service life, and ensure reliable heat transfer performance in the long term.

REFERENCES

- [1] A. Barun And E. Rukmana, “Analisis Performansi Pada Heat Exchanger Jenis Shell And Tube Tipe Bem Dengan Menggunakan Perubahan Laju Aliran Massa Fluida Panas (Mh),” *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 1, No. 2, Pp. 1–7, 2015.
- [2] A. Budiman And A. Syarief, “Analisis Perpindahan Panas Dan Efisiensi Efektif High Pressure Heater (Hph) Di Pltu Asam-Asam,” *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam*, Vol. 3, No. 2, Pp. 76–82, 2014.
- [3] A. M. Flynn, T. Akashige, And L. Theodore, *Kern’s Process Heat Transfer*. Wiley, 2019. Doi: 10.1002/9781119364825.
- [4] C. Wicaksono, E. Wijanarko, O. H. Simanullang, And A. Tahad, “Perancangan Eco Heat Exchanger Type 1-2 Shell And Tube Dan Pengaruh Jumlah Baffle Terhadap Transfer Panas,” *Jurnal Chemurgy*, Vol. 1, No. 1, P. 27, Apr. 2018, Doi: 10.30872/Cmg.V1i1.1136.
- [5] G. Marawijaya, L. Trisnaliani, And C. Purna, “Prototype Heat Exchanger Type Shell And Tube Ditinjau Dari Variasi Jarak Baffle Dan Laju Alir Massa Udara Panas Prototype Heat Exchanger Type Shell And Tube In Terms Of Variation Of Baffle Distance And Hot Air Flow Rate,” *Jurnal Kinetika*, Vol. 10, No. 01, Pp. 18–23, 2019.
- [6] I. Putra, “Studi Perhitungan Heat Exchanger Type Shell And Tube Dehumidifier Biogas Limbah Sawit Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Biogas,” *Jurnal Polimesin*, Vol. 15, No. 2, P. 42, Sep. 2017, Doi: 10.30811/Jpl.V15i2.373.
- [7] J. Sudrajat, “Analisis Kinerja Heat Exchanger Shell & Tube Pada Sistem Cog Booster Di Integrated Steel Mill Krakatau,” *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 6, No. 3, P. 174, Nov. 2017, Doi: 10.22441/Jtm.V6i3.1967.
- [8] M. R. Zain And A. Mustain, “Evaluasi Efisiensi Heat Exchanger (He - 4000) Dengan Metode Kern,” *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, Vol. 6, No. 2, Pp. 415–421, May 2023, Doi: 10.33795/Distilat.V6i2.133.
- [9] Pertamina Ep, “Company Profile Pertamina Ep Asset 4,” 2018.
- [10] S. Siagian, “Analisa Efektivitas Alat Penukar Kalor Jenis Shell And Tube Hasil Perencanaan Mahasiswa Skala Laboratorium,” *Bina Teknik*, Vol. 12, No. 2, P. 211, 2017, Doi: 10.54378/Bt.V12i2.75.

PERANCANGAN DAN ANALISIS *LOADER* INPUT MESIN TEMPERING PADA *LINE PRODUKSI HOT COIL SPRING* PT. XYZ

Aditya Nugraha¹, Agustinus Wisnu Setiawan¹, Yudha Samudra¹

¹ Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik ATMI Surakarta

Jl. Mojo No. 01, Karangasem, Laweyan, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57145

aditya.nugraha@atmi.ac.id¹

Abstrak

Loader merupakan alat pendukung produksi yang berfungsi untuk memindahkan benda kerja dari satu tempat ke tempat lainnya. *Loader* pada *input* mesin *tempering* memiliki prinsip kerja dengan memindahkan benda berupa *hot coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor yang ada pada mesin *tempering* sebagai proses *input* benda kerja. Permasalahan utama yang terjadi pada *loader* adalah kapasitas angkut yang terbatas yaitu 6 benda kerja dalam satu *cycle* dan terdapat getaran akibat konstruksi *loader* yang mengayun pada saat perpindahan material. Rancangan baru *loader* pada *input* mesin *tempering* diperlukan untuk meningkatkan kapasitas angkut benda kerja minimal sebesar 50% sesuai dengan permintaan pihak industri dan meminimalkan getaran akibat gerakan mengayun. Proses perancangan *loader input* mesin *tempering* menggunakan metode VDI 2222. Hasil penelitian berupa rancangan baru *loader* yang memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 3845 mm. Hasil perhitungan dan analisis konstruksi menunjukkan bahwa *loader* dapat meningkatkan kapasitas angkut benda kerja hingga 66% yaitu 10 pcs *coil spring*, dan *cycle time* menurun 29%, dari 11 detik menjadi 7,79 detik.

Kata kunci : *hot coil spring*, *loader*, metode VDI 2222.

Abstract

Loader is a production support tool that functions to move workpieces from one place to another. The *loader* at the *input* of the *tempering* machine has a working principle by moving objects in the form of *hot coil springs* from the *chain conveyor* to the conveyor on the *tempering* machine as a workpiece *input* process. The main problem that occurs with the *loader* is the limited transport capacity of 6 workpieces in one cycle and there is vibration due to the *loader* construction that swings when moving material. A new *loader* design at the *input* of the *tempering* machine is needed to increase the workpiece transport capacity by at least 50% according to industry requests and minimize vibrations due to swinging movements. The design process for the *input loader* of the *tempering* machine uses the VDI 2222 method. The results of the study are in the form of a new *loader* design that has total dimensions of 6000 × 1810 × 3845 mm. The results of the calculations and construction analysis show that the *loader* can increase the workpiece carrying capacity by up to 66%, namely 10 pcs *coil springs*, and the *cycle time* decreases by 29%, from 11 s to 7.79 s.

Key words : *hot coil spring*, *loader*, VDI 2222 method.

PENDAHULUAN

Industri otomotif merupakan salah satu sektor andalan yang memiliki kontribusi cukup besar terhadap perekonomian nasional Indonesia. Industri otomotif nasional menunjukkan perkembangan yang terbilang atraktif dalam beberapa tahun terakhir [1]. Pertumbuhan sektor otomotif berada di atas pertumbuhan ekonomi nasional dengan pertumbuhan cukup signifikan sejak kuartal kedua 2021 sehingga mampu meneruskan tren pemulihan hingga mencapai 10,26% pada kuartal ketiga 2022.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa optimalisasi sistem material *handling*, khususnya

melalui penggunaan mekanisme translasi, mampu meningkatkan efisiensi proses produksi secara signifikan. Mekanisme berbasis translasi seperti *ball screw* terbukti memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi serta mampu mereduksi getaran dibandingkan dengan mekanisme konvensional berbasis engsel [2] [3]. Selain itu, penerapan analisis numerik menggunakan Finite Element Analysis (FEA) pada tahap perancangan memungkinkan evaluasi kekuatan dan distribusi tegangan struktur secara komprehensif sebelum implementasi aktual di lapangan [4]. Dalam konteks metodologi desain, pendekatan sistematis seperti VDI 2222 telah banyak digunakan dalam perancangan sistem mekanik kompleks karena mampu mengakomodasi

proses pengembangan produk secara terstruktur dan terintegrasi [5] [6].

PT. XYZ selaku perusahaan manufaktur merupakan salah satu kontributor di industri otomotif yang memproduksi komponen kendaraan berupa *hot coil spring*. *Hot coil spring* memiliki permintaan pasar yang kian meningkat sejalan dengan perkembangan industri otomotif. Semakin besarnya permintaan *output* produksi, alat produksi yang digunakan diharapkan memiliki kemampuan yang memadai untuk dapat memenuhi tuntutan yang ada. Fasilitas produksi yang memiliki peranan penting dalam proses produksi *hot coil spring* salah satunya adalah *loader* yang berada pada *input* mesin *tempering*.

Loader merupakan alat pendukung produksi yang berfungsi untuk mengangkat dan memindahkan benda kerja [7]. *Loader* pada *input* mesin *tempering* memiliki prinsip kerja dengan memindahkan benda berupa *hot coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor mesin *tempering* sebagai proses *input* / memasukkan benda kerja. Konstruksi *loader* yang terpasang memiliki sistem pergerakan horizontal berupa engsel, salah satu ujung konstruksi *loader* terikat pada bagian atas rangka. Konstruksi *loader* menggunakan silinder *pneumatic* sebagai komponen pendorong dan dapat bergerak ke arah horizontal dengan cara mengayun, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Permasalahan utama yang terjadi pada *loader* adalah kapasitas angkut yang terbatas yaitu 6 benda kerja dalam satu *cycle*, terdapat getaran akibat konstruksi *loader* yang mengayun pada saat perpindahan material, dan *cycle time* sebesar 11 detik dalam satu kali proses kerja. Posisi konstruksi *loader* yang berada pada *input* mesin *tempering* membuat bagian pencekam benda kerja memiliki suhu yang cukup tinggi, yaitu hingga 100°C akibat radiasi termal.



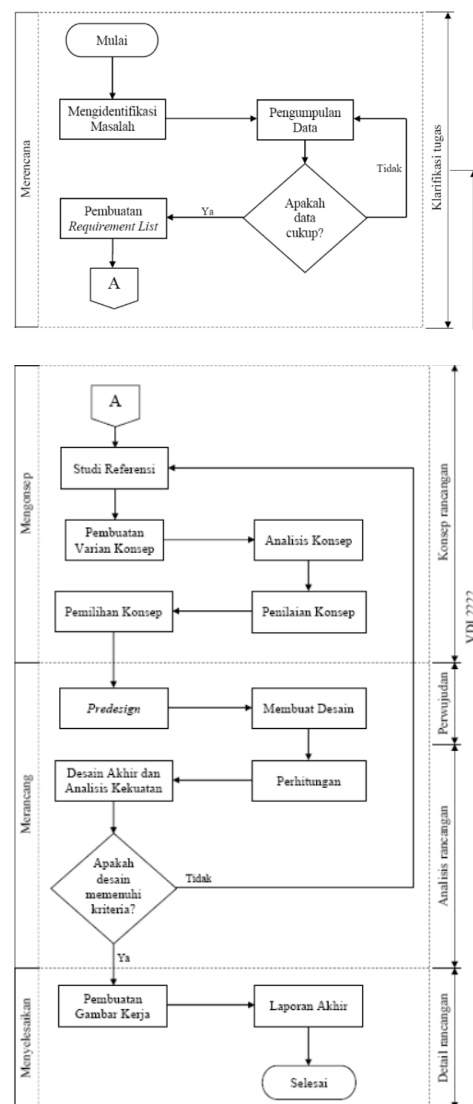
Gambar 1 Konstruksi Lama Loader

Berdasarkan kondisi konstruksi *loader* yang ada, PT. XYZ selaku pihak industri meminta untuk dilakukan perancangan ulang terhadap konstruksi *loader* pada *input* mesin *tempering*. Pihak industri juga meminta untuk dilakukan peningkatan kapasitas angkut *loader* menjadi 10 pcs. Perhitungan kekuatan dan analisis akan digunakan untuk menguji tingkat kekakuan konstruksi sehingga didapatkan gerakan mengayun yang minim. Proses perancangan

konstruksi dilakukan dengan memperhatikan faktor-faktor keamanan sehingga dapat dioperasikan dengan aman. Kebaruan penelitian ini terletak pada Transformasi mekanisme *loader* dari sistem ayun berbasis engsel menjadi sistem translasi berbasis ball screw, integrasi *dual-axis control* (servo + motor induksi) untuk meningkatkan presisi positioning, peningkatan performa signifikan yang belum dicapai pada penelitian sebelumnya terkait *loader* industri.

METODE PENELITIAN

Verein Deutsche Ingenieur (VDI) 2222 adalah metode perancangan yang digunakan dalam penelitian dengan konsep sistem [8]. Tahap perancangan menurut VDI 2222 dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu merencana, mengonsep, merancang, dan menyelesaikan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Tahap Merencana

Tahap merencana terdiri dari tiga kegiatan, yaitu identifikasi masalah pada konstruksi lama *loader*, pengumpulan data sebagai bahan pendukung penelitian, dan pembuatan *requirement list* (Tabel 1) sebagai acuan dalam membuat desain. Adapun identifikasi masalah bertujuan untuk menentukan permasalahan-permasalahan yang menjadi dasar dilakukannya penelitian. Pengumpulan data dapat berasal dari hasil pengamatan langsung, wawancara, maupun dokumentasi.

Tabel 1 Requirement List

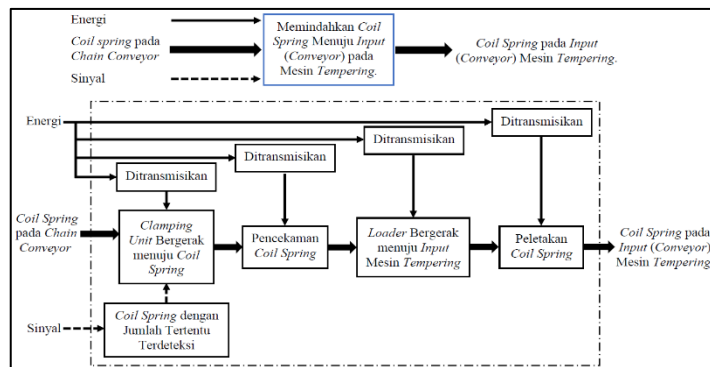
Persyaratan	Kuantifikasi	Ket.
1 Persyaratan Utama		
1.1 Panjang Langkah	- Tinggi dari lantai : 1.900 - 2.000 mm - Pergerakan panjang minimal : 750 mm	
1.2 Getaran yang minim		
1.3 Kapasitas angkut	- Jumlah benda : 6 - 10 pcs - Diameter luar benda : 98 - 178 mm - Panjang maksimal benda : 250 mm - Berat maksimal tiap benda : 4.57 kg	
1.4 Kecepatan <i>cycle time</i>	- Lebih cepat dari 11 detik	
1.5 Suhu kerja	- Pada beberapa bagian konstruksi dapat bekerja pada suhu hingga 100°C	
2 Persyaratan Minimum		
2.1 Umur pakai	≥ 3 Tahun	IV
2.2 Penggunaan bebas perawatan	Pelumasan tipis pada permukaan yang bergesekan	II
2.3 Material konstruksi kuat dan ringan		III
2.4 Termin	Agustus 2023	IV
3 Keinginan / Harapan		
3.1 Penggunaan ruang efisien		
3.2 Perakitan mudah		
3.3 Perawatan mudah		

Keterangan Persyaratan:
 IV : Sangat penting sekali II : Penting
 III : Sangat penting I : Tidak penting

Pembuatan *requirement list* secara umum dilakukan dengan mengacu pada hal-hal penting yang dibutuhkan oleh pihak industri.

Tahap Mengonsep

Tahap mengonsep diawali dengan pembuatan struktur fungsi. Struktur fungsi digunakan sebagai dasar pembuatan konsep varian dalam penelitian. *Loader input* mesin *tempering* secara umum ber-fungsi sebagai pemindah *coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor pada mesin *tempering* yang dapat didefinisikan sesuai Gambar 3.



Gambar 3 Struktur fungsi

Setelah mendefinisikan struktur fungsi konstruksi *loader*, tahap mengonsep dilanjutkan dengan membuat varian konsep. Pembuatan varian konsep dilakukan dengan menggunakan morfologi desain seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Morfologi Desain

Parameter	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Komponen Penggerak Vertikal	Motor Servo	Pneumatic	Hydraulic
Pencetak Coil Spring	Gripper Custom	Gripper Model Standard	
Sistem Pergerakan Horizontal	Pergerakan Linier (Lurus)	Pergerakan Engsel (Mengayut)	
Komponen Penggerak Horizontal	Pneumatic	Motor Induksi	Hydraulic
Komponen Transmisi Vertikal	Roda Gigi	Sabuk-Puli	Rantai-Sprocket
Komponen Transmisi Horizontal	Roda Gigi	Sabuk-Puli	Rantai-Sprocket
Jenis Sabuk	Flat Belt	V-Belt	Timing Belt
Rangka Dasar	Baja Hollow	Baja Balok	Baja Kanal
Sistem Sliding	Linier Motion	Guide Pin & Bush	
Jenis Bantalan Utama	Gelinding	Luncur	

Keterangan: Varian 1 = — Varian 2 = — Varian 3 = — Desain Asli = —

Morfologi desain yang dibuat menghasilkan tiga varian baru dan satu varian lama. Masing-masing konsep dari varian baru dianalisis dan dinilai berdasarkan penilaian teknis dan juga ekonomis untuk menentukan varian terbaik. Penilaian varian konsep dengan beberapa aspek dan pembobotan tertentu dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

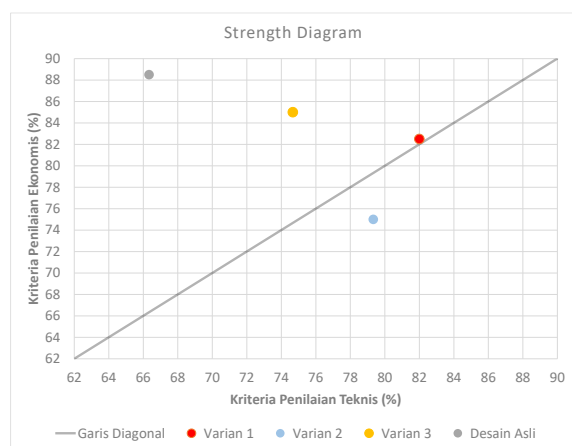
Tabel 3 Penilaian Teknis

Kriteria Penilaian Teknis	Bobot	Varian 1		Varian 2		Varian 3		Desain Asli		Nilai Ideal	
		Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai
Kekuatan Konstruksi	3	7	21	10	30	8	24	7	21	10	30
Efektifitas Gerakan	5	10	50	8	40	7	35	8	40	10	50
Ketepatan Posisi	4	9	36	7	28	6	24	6	24	10	40
Keamanan Konstruksi	3	8	24	9	27	8	24	7	21	10	30
Kemudahan Perawatan	2	7	14	8	16	9	18	8	16	10	20
Kemudahan Perakitan	2	6	12	7	14	8	16	7	14	10	20
Faktor Kebisingan	2	8	16	6	12	6	12	5	10	10	20
Tingkat Getaran	5	9	45	7	35	7	35	5	25	10	50
Keandalan	4	7	28	9	36	9	36	7	28	10	40
Total		71	246	71	238	68	224	60	199	90	300
Nilai Teknis		0.82		0.793		0.747		0.663		1	
Presentase (%)		82		79.3		74.7		66.3		100	
Peringkat		1		2		3		4			

Tabel 4 Penilaian Ekonomis

Kriteria Penilaian Ekonomis	Bobot	Varian 1		Varian 2		Varian 3		Desain Asli		Nilai Ideal	
		Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai
Biaya Bahan Baku Material	5	9	45	6	30	7	35	9	45	10	50
Biaya Standard Part	4	8	32	8	32	9	36	9	36	10	40
Biaya Permesinan	3	8	24	8	24	9	27	9	27	10	30
Biaya Perakitan	3	8	24	8	24	9	27	8	24	10	30
Biaya Perawatan	3	8	24	8	24	9	27	9	27	10	30
Biaya Desain	2	8	16	8	16	9	18	9	18	10	20
Total		49	165	46	150	52	170	53	177	60	200
Nilai Teknis		0.825		0.75		0.85		0.885		1	
Presentase (%)		82.5		75		85		88.5		100	
Peringkat		3		4		2		1			

Berdasarkan penilaian teknis dan penilaian ekonomis yang telah dilakukan, pemilihan varian konsep terbaik dapat dipertimbangkan dengan menggunakan *strength diagram* seperti pada Gambar 4. Pemilihan varian konsep terbaik dipilih berdasarkan varian dengan nilai / *rating* paling mendekati garis diagonal dengan arah sumbu positif. *Strength diagram* menunjukkan bahwa varian konsep 1 merupakan konsep terbaik karena memiliki *rating* yang paling mendekati garis diagonal positif.

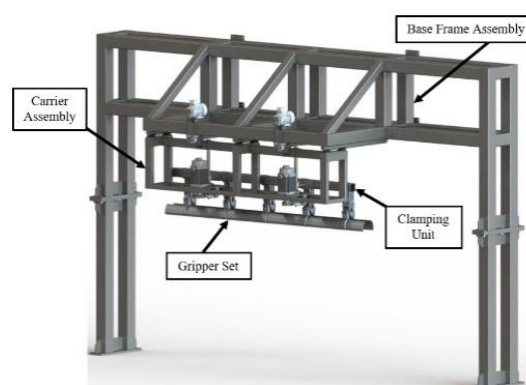


Gambar 4 Strength Diagram

Tahap Merancang

Tahap merancang diawali dengan proses *predesign*. *Predesign* meliputi proses pembuatan daftar urutan komponen yang akan dirancang dan pengumpulan referensi berupa katalog *standard part* maupun data-data lain yang berhubungan dengan desain yang akan dibuat. Proses selanjutnya dalam tahap merancang adalah proses membuat desain dari varian konsep terpilih yang dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Solidworks*. Tahap merancang diselesaikan dengan proses perhitungan dan analisis hasil desain. Proses perhitungan dan analisis bertujuan untuk memastikan desain yang dibuat apakah dapat memenuhi kebutuhan / standar tertentu atau tidak. Perhitungan dapat dilakukan dengan menggunakan standar rumus-rumus perhitungan dan analisis terhadap kekuatan konstruksi *loader* menggunakan FEA pada *software Solidworks*.

Varian konsep 1 sebagai konsep terpilih direalisasikan ke dalam bentuk desain rancangan pada tahapan proses merancang. Varian konsep 1 merupakan alternatif desain konstruksi yang memiliki dasar penggerak berupa motor listrik. Motor listrik yang digunakan sebagai penggerak dengan arah sumbu vertikal adalah motor *servo* dan horisontal adalah motor induksi. Motor listrik akan ditransmisikan ke komponen *screw shaft* sehingga dapat melakukan pergerakan ke arah vertikal maupun horizontal dengan jarak / posisi tertentu. Komponen transmisi yang digunakan untuk *axis* vertikal berupa rantai dan *sprocket*, sedangkan pada *axis* horizontal berupa sabuk dan puli (*pulley*). Penggunaan meka-nisme motor dan *shaft screw* memungkinkan konstruksi varian konsep 1 seperti pada Gambar 5, untuk dapat menentukan jarak pergerakan seefisien mungkin.



Gambar 5 Varian Konsep 1

Tahap Menyelesaikan

Tahap menyelesaikan terdiri dari proses pembuatan gambar kerja dan laporan akhir. Pembuatan gambar kerja dilakukan setelah didapatkan desain akhir yang telah melalui proses

analisis. Gambar kerja secara umum dibuat dalam bentuk gambar 2D dan 3D dengan tampilan berupa *assembly* maupun detail dari *sub-assembly*. Proses akhir dari kegiatan penelitian menggunakan metode VDI 2222 adalah membuat kesimpulan dari rangkaian kegiatan perancangan yang telah selesai dilakukan sebagai penutup suatu laporan konstruksi. Rangkaian seluruh rangkaian kegiatan penelitian dapat dituliskan dalam laporan akhir.

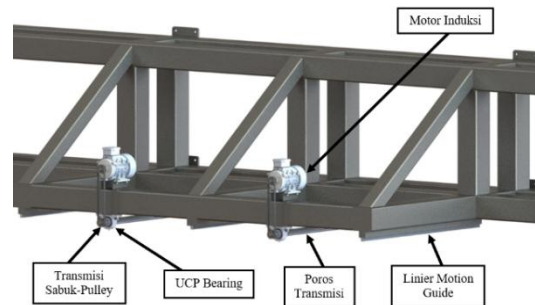
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan

Rancangan konstruksi *loader input* mesin *tempering* pada *line* produksi *hot coil spring* dibuat berdasarkan konsep varian terpilih yang telah melalui proses penilaian baik secara teknis maupun ekonomis. Rancangan konstruksi *loader* dibagi ke dalam 4 *sub-assembly* / bagian utama yang terdiri dari *base frame assembly*, *carrier assembly*, *clamping unit*, dan *grripper set*. *Base frame assembly* merupakan bagian *loader* yang berfungsi sebagai penopang / penyangga utama konstruksi secara keseluruhan. *Carrier assembly* pada *loader* berfungsi untuk memungkinkan konstruksi bergerak secara horizontal, sedangkan *clamping unit* untuk memungkinkan bergerak secara vertikal. Proses penekaman benda kerja berupa *coil spring* pada konstruksi *loader* dilakukan oleh *grripper set* yang secara keseluruhan berjumlah 5 unit. Secara umum konstruksi *loader input* mesin *tempering* pada *line* produksi *hot coil spring* memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 3845 mm.

Base Frame Assembly

Base frame assembly terdiri dari beberapa komponen rangka, *ball screw*, motor induksi, *bearing*, *pulley*, sabuk, *linier motion guide*, seperti terlihat pada Gambar 6. Komponen rangka pada *base frame assembly* dibuat dengan kombinasi besi plat dan *hollow* berjenis MS (*Mild Steel*) yang disatukan menggunakan proses pengelasan. Rangka dasar dibuat dengan mempertimbangkan ukuran dan posisi pemasangan konstruksi lama *loader*. Motor induksi yang ter-pasang pada rangka berfungsi sebagai penggerak poros transmisi untuk memungkinkan terjadinya pergerakan horisontal pada sistem melalui transmisi sabuk-*pulley*. Komponen *linier motion guide* sebanyak 3 unit digunakan sebagai penyangga beban dari *carrier assembly* dan sekaligus sebagai pemandu pergerakan horisontal.

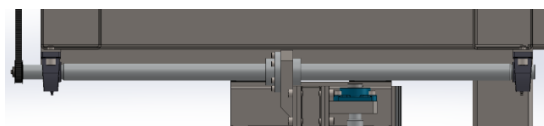


Gambar 6 Base Frame Assembly

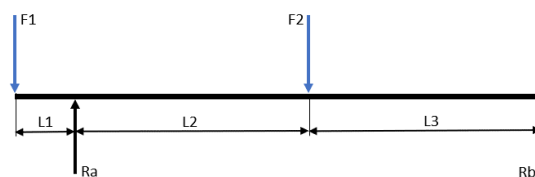
Rancangan *base frame assembly* yang dibuat akan dipasangkan pada lantai pabrik dan juga dinding / *body* mesin *tempering* sesuai dengan *layout* pabrik yang ada. *Base frame assembly* memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 1995 mm. Perhitungan yang digunakan sebagai dasar pemilihan jenis / spesifikasi komponen akan dijabarkan lebih lanjut sebagai berikut:

a. Perhitungan poros transmisi

Poros transmisi pada *base frame assembly* berupa *ball screw* akan dipasangkan dengan sebuah *ball screw bearing* untuk membentuk sistem pergerakan horisontal pada *loader*. Ukuran diameter minimum poros transmisi dapat ditentukan berdasarkan besaran dan posisi beban yang diterima (momen bengkok), serta jenis material poros yang digunakan. Posisi pem-bebanan dan ilustrasi gaya pada poros transmisi dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7 Poros Transmisi Base Frame Assembly



Gambar 8 Ilustrasi Gaya pada Poros

Beban total komponen transmisi F1 dan *carrier assembly* F2kN yang diterima oleh *ball screw* adalah 2,453 N dan 866,604 N. Panjang L1, L2, dan L3 secara berurutan adalah 80, 595, dan 595 mm. Nilai Ra dan Rb dapat dihitung dengan menggunakan rumus kesetimbangan:

$$\Sigma F_y = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Sigma M_a = 0 \dots\dots\dots (2)$$

Sehingga, didapatkan nilai Ra dan Rb sebesar 435,92 N dan 433,137 N. Ra > Rb, maka Ra

digunakan untuk mencari momen bengkok maksimal dan berfungsi sebagai momen virtual (M_v) pada perhitungan diameter minimal poros. Batas tekuk (σ_{bD}) dan angka keamanan (V) yang dimiliki *ball screw* adalah 625 N/mm^2 dan $2,5$. Berdasarkan data yang ada, dapat ditentukan tegangan bengkok ijin sementara ($\overline{\sigma_b}'$), momen virtual (M_v), dan diameter inti sementara (d_k') dengan rumus sebagai berikut:

$$\overline{\sigma_b}' = \frac{\sigma_{bD}}{V} \dots\dots\dots(3)$$

$$M_v = Ra (L2 + L3) \dots\dots\dots(4)$$

$$d_k' = \sqrt[3]{\frac{M_v}{0,1 \times \overline{\sigma_b}'}} \dots\dots\dots(5)$$

Berdasarkan perhitungan maka didapat-kan faktor kekasaran permukaan (b_1), faktor ukuran (b_2), angka efek lekuk (β_k), dan angka keamanan (V) sebesar $0,95$, $0,9$, 2 , dan $1,5$. Data hasil perhitungan dapat digunakan untuk me-mentukan tegangan bengkok ijin sebenarnya ($\overline{\sigma_b}$) dan diameter inti sebenarnya (d_k) untuk me-ngetahui diameter minimal poros (d) sesuai dengan rumus berikut:

$$\overline{\sigma_b} = \frac{\sigma_{bD} \times b_1 \times b_2}{\beta_k \times V} \dots\dots\dots(6)$$

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{M_v}{0,1 \times \overline{\sigma_b}}} \dots\dots\dots(7)$$

$$d = d_k + t_1 \dots\dots\dots(8)$$

Perhitungan menghasilkan ukuran dia- meter minimal poros (d) sebesar $30,766 \text{ mm}$. Diameter minimal poros yang dipilih untuk desain konstruksi dengan menyesuaikan diameter dalam bearing adalah 35 mm .

b. Perhitungan sabuk / belt

Jenis komponen penerus transmisi yang digunakan untuk pergerakan horizontal pada *loader* adalah transmisi sabuk-*pulley*. Jenis *pulley* yang digunakan adalah *timing pulley* dengan kode produk **PTPP30P5M150-A-N19**. Dimensi *timing belt* dapat ditentukan dari diameter *pulley* yang digunakan dan jarak antar sumbu yang diperlukan, kemudian disesuaikan dengan panjang sabuk yang tersedia pada katalog. Ukuran diameter dan jarak sumbu *pulley* diketahui sebesar $46,6 \text{ mm}$ dan $331,9 \text{ mm}$. Per- hitungan dalam pemilihan panjang *timing belt* (ℓ) dapat menggunakan rumus berikut:

$$\ell = 2 \times \text{jarak sumbu} + \text{keliling pulley}(9)$$

Maka, didapatkan hasil perhitungan pan- jang *timing belt* yang diperlukan sebesar $810,198 \text{ mm}$. Panjang *timing belt* yang tersedia di katalog dan paling mendekati hasil perhitungan adalah 810 mm .

c. Perhitungan motor induksi

Komponen penggerak yang digunakan dalam pergerakan horizontal adalah motor induksi yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai pengatur koordinat pergerakan. Pemilihan jenis motor induksi dilakukan dengan memper-timbangkan kapasitas torsi, ukuran poros, dan kecepatan putaran motor. Ukuran poros motor dipilih dengan menyesuaikan ukuran pasangan *pulley*. Beban total yang diterima motor didapat-kan dari total massa semua poros, *pulley*, dan komponen lain yang berkaitan secara langsung dengan sistem transmisi, dikalikan dengan per-cepatan gravitasi (g) dan koefisien gesek (f_c). Torsi yang akan digunakan sebagai dasar pemilihan spesifikasi motor induksi didapat berdasarkan beban *axial* (F_2), *pitch* (Ph) poros transmisi / *ball screw*, dan angka keamanan (V). Per- hitungan torsi minimal yang dibutuhkan motor menggunakan rumus berikut:

$$\tau = \frac{F_2 \times Ph}{2 \times \pi} \times V \dots\dots\dots(10)$$

Perhitungan torsi memiliki hasil bahwa motor induksi yang digunakan sebagai peng-gerak sistem horizontal harus memiliki torsi lebih dari 1.260 Nm .

d. Perhitungan umur pakai bearing

Jenis *bearing* yang dipakai untuk me- numpu poros transmisi pergerakan horizontal adalah *bearing UCP*. *Bearing UCP 207* memiliki kapasitas beban dinamis (C) sebesar 15.400 N . *Bearing* menerima beban (P) sebesar $435,92 \text{ N}$, memiliki nilai konstanta (q) sebesar 3 , dan memiliki kece- patan putaran (n) sebesar 910 Rpm . Perhitungan umur pakai bearing (L_h) dapat menggunakan rumus berikut:

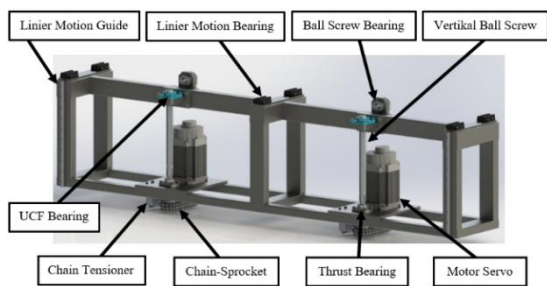
$$\left(\frac{C}{P}\right)^q = \frac{L_h \times n \times 60}{10^6} \dots\dots\dots(11)$$

Sehingga, umur pakai *bearing UCP 207* adalah $807,512 \times 10^6 \text{ jam}$.

Carrier Assembly

Carrier assembly merupakan bagian dari *loader* yang berfungsi sebagai pembawa atau tempat meletakkan komponen-komponen *loader* yang berfungsi sebagai sistem pergerakan vertikal. *Carrier assembly* terdiri dari komponen rangka, poros transmisi vertikal, *thrust bearing*, *ball screw bearing*, motor *servo*, *sprocket*, *chain tensioner*, *linier motion guide*, *linier motion bearing*, yang dapat dilihat pada Gambar 9. Rangka pada *carrier assembly* menggunakan kombinasi besi plat dan *hollow* ber- jenis MS. Komponen penggerak vertikal yang digunakan adalah motor *servo* yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai sensor titik koor- dinat dan *electromagnetic brake* untuk menahan beban pada saat berhenti, serta menggunakan pa- sangan *chain-*

sprocket sebagai penyalur sistem transmisi. *Carrier assembly* memiliki 6 buah *linier motion bearing* pada bagian atas rangka dan 2 buah *linier motion guide* pada salah satu sisi samping rangka sebagai pemandu pergerakan vertikal. *Carrier assembly* juga memiliki 2 buah *ball screw bearing* pada bagian atas rangka yang berfungsi sebagai penghubung poros transmisi horisontal.



Gambar 9 Carrier Assembly

Carrier assembly memiliki dimensi total sebesar 2750 × 425 × 771 mm. Beberapa perhitungan yang digunakan sebagai dasar pemilihan komponen pada *carrier assembly* akan dijabarkan sebagai berikut:

a. Perhitungan poros transmisi

Poros transmisi yang digunakan pada *carrier assembly* adalah *ball screw* yang dipasang dengan *ball screw bearing* untuk membentuk sistem pergerakan vertikal pada *loader*. Perhitungan beban minimum yang perlu diangkat oleh setiap poros vertikal *ball screw* (W) didapatkan dari jumlah total massa benda kerja (m.BK) dan *clamping unit* (m.CU), kemudian dikalikan dengan percepatan gravitasi (g) dan dibagi dengan jumlah sistem transmisi, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$W = \frac{(10 \times m.BK + m.CU) \times g}{2} \dots\dots\dots(12)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beban minimal yang harus diangkat oleh masing-masing vertikal *ball screw* adalah 1,030 kN. Tipe pasangan vertikal *ball screw* dan *ball screw bearing* yang dipilih memiliki kapasitas beban *axial* statis sebesar 91,5 kN, sehingga dapat dinyatakan bahwa tipe yang digunakan memenuhi dasar perhitungan elemen konstruksi.

b. Perhitungan rantai / chain

Komponen penerus transmisi pada sistem pergerakan vertikal pada *loader* adalah transmisi *chain-sprocket*. Penggunaan tipe transmisi *chain-sprocket* bertujuan untuk memastikan *loader* dapat menahan beban pada koordinat ketinggian tertentu dengan aman. Jenis *sprocket* yang di-gunakan adalah *two-row sprocket*. Dimensi dan jumlah mata rantai

dapat ditentukan dari diameter *sprocket* yang digunakan dan jarak antar sumbu yang di-perlukan. Ukuran diameter dan jarak sumbu *sprocket* diketahui sebesar 91,62 mm dan 175 mm. Perhitungan dalam pemilihan panjang rantai (ℓ) dan jumlah rantai (n) dapat menggunakan rumus berikut:

$$\ell = 2 \times \text{jarak sumbu} + \text{keliling rantai}(13)$$

$$n = \frac{\text{Panjang total lintasan rantai}}{\text{Pitch rantai}} \dots\dots\dots(14)$$

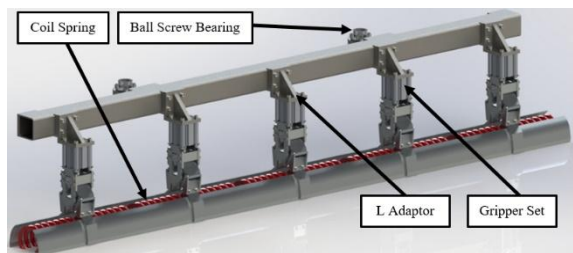
Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan ukuran panjang lintasan rantai yang diperlukan adalah 637,833 mm dan jumlah mata rantai yang dibutuhkan adalah 34 unit.

c. Perhitungan motor servo

Komponen penggerak yang digunakan dalam pergerakan vertikal adalah motor *servo* yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai sensor titik koordinat dan *electromagnetic brake* untuk menahan beban pada saat berhenti. Pemilihan jenis motor *servo* dilakukan dengan mem-pertimbangkan kapasitas torsi, ukuran poros, dan kecepatan putaran motor yang seminim mungkin. Ukuran poros motor dipilih dengan menyesuaikan ukuran *sprocket*. Beban *axial* total (F₂) yang diterima motor didapatkan dari total massa semua komponen yang berkaitan secara langsung dengan sistem transmisi, kemudian dikalikan percepatan gravitasi (g) dan dibagi dengan jumlah sistem transmisi. Torsi yang akan di-gunakan sebagai dasar pemilihan spesifikasi motor *servo* didapat menggunakan Rumus 10 sehingga motor *servo* yang akan digunakan sebagai penggerak sistem pergerakan vertikal harus memiliki torsi lebih besar dari 6,556 Nm.

Clamping Unit

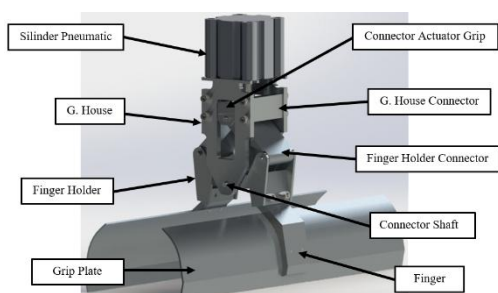
Clamping unit merupakan bagian dari *loader* yang dapat bergerak secara vertikal dan berfungsi sebagai dasar penempatan gripper [9]. Clamping unit terdiri dari komponen rangka, linier motion bearing, ball screw bearing, gripper set, dll. Gambar 10 menunjuk-kan bahwa clamping unit dapat mengangkat 10 pcs coil spring dengan panjang masing-masing sebesar 250 mm. Coil spring dicekam secara berjajar dengan jarak antar benda sebesar 50 mm. Clamping unit menggunakan kombinasi besi plat dan hollow berjenis MS. Rangka pada clamping unit memiliki 2 buah linier motion bearing pada salah satu sisi samping dan 2 buah ball screw bearing yang ber-hubungan dengan vertikal ball screw sebagai pem-bentuk sistem pergerakan vertikal. Clamping unit memiliki dimensi sebesar 3000 × 485 × 568 mm.



Gambar 10 Clamping Unit

Gripper Set

Gripper set adalah alat yang berfungsi sebagai pencekam benda kerja berupa coil spring pada konstruksi loader. Gripper set (Gambar 11) terdiri dari beberapa komponen, di antaranya yaitu silinder pneumatic, kerangka, connector bush, grip plate.



Gambar 11 Gripper Set

Gripper set yang terpasang pada rangka clamping unit berjumlah 5 buah dengan kapasitas pencekaman maksimal benda sebesar Ø 183 mm. Gripper set secara umum memiliki dimensi sebesar 600 × 219 × 440,5 mm. Komponen pendorong pada gripper set yang berfungsi sebagai penggerak mekanisme pencekaman adalah sebuah silinder pneumatic. Pemilihan tipe / spesifikasi Silinder pneumatic pada gripper set didasarkan pada besarnya kapasitas daya dorong dan menyesuaikan dengan ukuran rangka gripper. Silinder pneumatic pada gripper set menerima beban yang harus diangkat sebesar 215,231 N. Perhitungan kapasitas gaya (F) yang digunakan sebagai pertimbangan dalam memilih silinder pneumatic adalah sebagai berikut:

$$F = p \times A \dots\dots\dots(15)$$

Silinder pneumatic terpilih memiliki ukuran bore Ø80 mm dan stroke 50 mm. Silinder pneumatic juga memiliki tekanan kerja sebesar 500.000 Pa dan luasan bore sebesar 0,00503 m², sehingga memiliki kapasitas gaya se-besar 2.513,274 N. Tipe silinder pneumatic yang digunakan memenuhi dasar perhitungan elemen konstruksi.

Perhitungan Cycle Time

Perhitungan total cycle time pergerakan loader dari posisi diam hingga kembali ke posisi awal dihitung berdasarkan kecepatan pencekaman

(pergerakan pneumatic), putaran motor (n), dan juga pitch/revolution (Ph) dari poros transmisi (ball screw). Perhitungan cycle time (t) secara umum dilakukan dengan mengalikan kecepatan linier (V_{linier}) dengan panjang langkah (ℓ). Perhitungan cycle time loader pada kondisi optimal menggunakan rumus berikut:

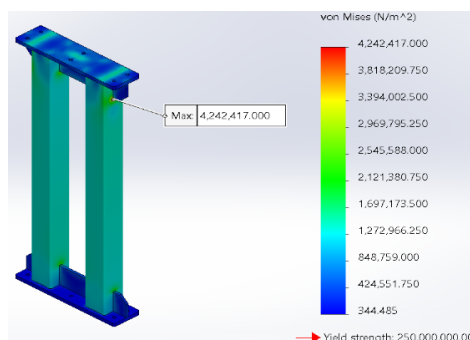
$$V_{linier} = \frac{n \times Ph}{60 \times 10^3} \dots\dots\dots(16)$$

$$t = \frac{\ell_1}{v_{linier}} \dots\dots\dots(17)$$

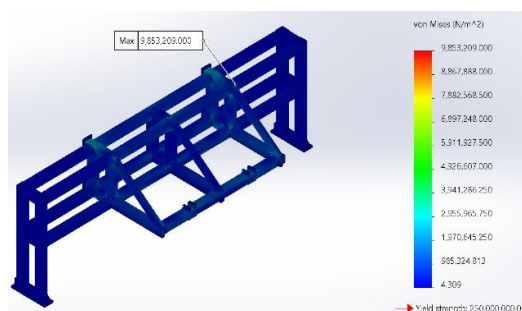
Maka, didapatkan hasil perhitungan bahwa konstruksi loader yang baru memiliki cycle time pada kondisi optimal sebesar 7,788 detik sehingga lebih cepat dari konstruksi lama loader yang memiliki cycle time sebesar 11 detik. Dibandingkan desain lama, performa dari segi kapasitas naik 66% dan cyle time turun 29%.

Hasil Analisis

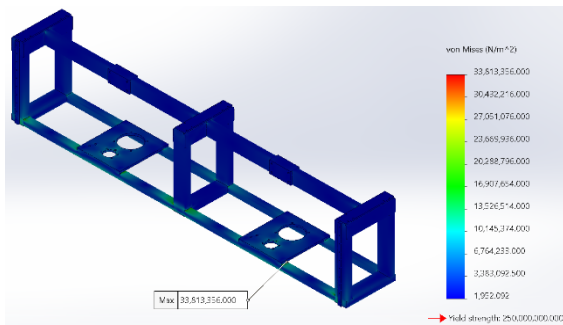
FEA pada software Solidworks digunakan untuk menganalisis kekuatan konstruksi loader, terutama pada bagian rangka. Metode FEA digunakan untuk menganalisis hasil desain dengan menyesuaikan material, constraint, dan load yang mewakili kondisi sebenarnya agar mendapatkan hasil yang seakurat mungkin [10]. Penggunaan FEA bertujuan untuk memastikan keamanan konstruksi rangka dengan membandingkan von Mises terhadap yield strength dari material rangka. Hasil analisis pada rangka loader menggunakan metode FEA adalah sebagai berikut:



Gambar 12 Analisis FEA Foot Frame



Gambar 13 Analisis FEA Base Frame



Gambar 14 Analisis FEA Carrier Frame

Hasil analisis FEA pada komponen *foot frame*, *base frame*, dan *carrier frame* menunjukkan bahwa tegangan *von Mises* yang diterima oleh masing-masing rangka sebesar 3.370 MPa, 9.853 MPa, dan 33.813 MPa. *Yield strength* maksimal yang dapat diterima masing-masing rangka dengan material *hollow* dan plat MS adalah sebesar 250.000 MPa, sehingga rangka konstruksi *loader* aman dan dapat memenuhi pembebanan yang ada. Seluruh komponen rangka memiliki *safety factor* antara 7–74 sehingga berada jauh di atas batas minimum desain ($SF \geq 2$), sehingga konstruksi dinyatakan aman.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari Perancangan dan Analisis *Loader Input Mesin Tempering* pada *Line Produksi Hot Coil Spring* PT. XYZ. yaitu:

1. Rancangan *loader input mesin tempering* memiliki sistem pergerakan baru dengan menggunakan *ball screw* sehingga tidak terdapat lagi pergerakan mengayun sehingga menghilangkan sumber getaran utama dan memiliki kapasitas angkut lebih besar hingga 10 pcs *coil spring*, naik sebesar 66% dan cycle time menurun 29%, dari 11 detik menjadi 7,79 detik.
2. Hasil analisis FEA pada rangka menunjukkan bahwa komponen *foot frame*, *base frame*, *carrier frame*, dan *clamping frame* secara berurutan memiliki nilai *von Mises* sebesar 3.370 MPa, 9.853 MPa, dan 33.813 MPa, sedangkan *yield strength* yang dimiliki material rangka adalah 250.000 MPa dengan *safety factor* antara 7–74 sehingga dapat disimpulkan konstruksi rangka kuat dan aman.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ilyas, M. F. H. (2024). *Rancang Bangun Multiple Drilling Menggunakan Robot Lengan Dan Perencanaan Handling Station Stacking magazine Pada Proses Drilling Di PT. Yamaha Elektronik Manufacturing Indonesia (YEMI)*

(Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia). Wardenier, J. 2001. *Hollow Sections in Structural Applications*. Netherlands: Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire.

- [2] Li, T. J., Wang, M. Z., Zhang, Y. M., & Zhao, C. Y. (2020). Real-time thermo-mechanical dynamics model of a ball screw system based on a dynamic thermal network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(1), 613-624.
- [3] Müller, J. H. (2021). *Entwicklung, Aufbau & Erprobung eines Sekundärreflektors zur experimentellen Verwendung im Hochleistungsstrahler SYNLIGHT* (Doctoral dissertation, Hochschule Kaiserslautern).
- [4] Park, H., Han, J. W., Na, W., & Yu, J. (2023). Characterizing the biaxial compressive deformation behavior of epoxy polymer through cruciform experiment and finite element analysis. *Composite Structures*, 305, 116488.
- [5] Salimi, A. A. (2023). Simulasi Finite Element Analysis (Fea) Dan Fabrikasi Implan Untuk Perbandingan Kinerja Implan Kovensional Dan Custom Cruciate Retaining (Cr) Untuk Penderita Osteoarthritis Berdasarkan Rekonstruksi Data Mri/Ct Scan Tulang Lutut.
- [6] Sarmidi, S., Faisal, M., Mases, Y., Nurbaiti, N., & Nuryanneti, I. (2025). Optimalisasi Kinerja dan Keselamatan Kerja Melalui Implementasi Prosedur Pemeriksaan dan Pengecekan Harian (P2H) Unit Wheel Loader WA-200-5 di Pabrik Briket Tanjung Enim PT. Bukit Asam Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 3(2), 260-268.
- [7] Suryaman, Y., Nuridah, S., & Sagitarius, E. (2023). Analisis Pengaruh Leverage dan Rasio Aktivitas terhadap Profitabilitas Perusahaan Manufaktur Sub Sektor Otomotif dan Komponen yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia Tahun 2017-2022. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 3(4), 7835-7844.
- [8] Wang, D., Zhang, S., Wang, L., & Liu, Y. (2021). Developing a ball screw drive system of high-speed machine tool considering dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(5), 4966-4976.
- [9] Wijaya, D. K., Hartono, B. R., Jazuli, J., & Izzhati, D. N. (2024). Optimizing product design and development of engine carbon

cleaning maintenance tools using reverse engineering and VDI 2222 methods. *OPSI*, 17(1), 185-203.

- [10] Wijaya, D. K., Hartono, B. R., Jazuli, J., & Izzhati, D. N. (2024). Optimizing product design and development of engine carbon

cleaning maintenance tools using reverse engineering and VDI 2222 methods. *OPSI*, 17(1), 185-203. Rhakasywi, D. 2015. Rancang Bangun Elemen Mesin 3D dengan *Solidworks*. *Handbook* pe-tunjuk penggunaan *software Solidworks*.

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)

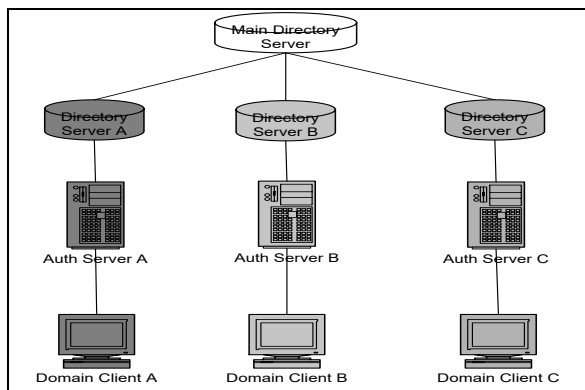
| Kolom 1 | Kolom 2 | Kolom 3 | Kolom 4 |
|---------|---------|---------|---------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

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 Babel IV - Program Studi Teknik Mesin
Jurusan Teknologi Industri dan Rekayasa Pertambangan
Fakultas Sains dan Teknik UBB
Kampus Terpadu Universitas Bangka Belitung, Balunijuk,
Bangka, Prov. Bangka Belitung
Laman : <https://mesin.ubb.ac.id>
E-mail : teknikmesinunivbabel@gmail.com

