

Sistem Pengukuran Defleksi *Crankshaft* Dengan Visualisasi Pola Defleksi

Eko Supriyanto^a, Susilo Adi Widyanto^b, Sahrijal Purba^a, Ariyana Dwiputra^a, Meiri Triani^a, Rasgianti^a, Ruly Sitanggang^a, Nur Cahyo^{a*}

^a PLN Puslitbang, PT. PLN (PERSERO)

Jl. Duren Tiga Raya No.102, Jakarta Selatan, Indonesia

^b Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: nurcahyo3@pln.co.id

Abstract

The crankshaft is one of the main components of a combustion engine. Due to the engine's operating conditions and operation time, the crankshaft alignment may deviate to a particular value that should not exceed the standard limit. When the deviation value has exceeded the limit, the crankshaft will fail. In this research, the design of the crankshaft deflection measurement system was carried out with the visualization of the deflection pattern. The method is done by measuring five positions of the axial deviation between the web surfaces on each piston using a digital dial indicator. Measurement data at each point is then sent and stored in the control panel device wirelessly. Furthermore, the complete measurement data is taken, processed, and displayed in the developed software application to visually display the crankshaft deflection pattern. The test results show that the accuracy of the measuring instrument is 0.001 mm, where this value has met the prerequisites for testing the crankshaft deflection, which is 0.12 mm.

Kata kunci: Diesel engine, crankshaft, deflection, measuring device

Abstrak

Crankshaft merupakan salah satu komponen utama pada mesin motor bakar. Seiring dengan waktu dan kondisi pengoperasian mesin, kesejajaran *crankshaft* dapat terdeviasi dalam nilai tertentu yang seharusnya tidak boleh melebihi batas standarnya. Ketika nilai deviasi yang terjadi telah melewati batas, *crankshaft* akan mengalami kegagalan. Pada penelitian ini telah dilakukan rancang bangun sistem pengukuran defleksi *crankshaft* dengan visualisasi pola defleksi. Metode dilakukan dengan pengukuran lima posisi simpangan aksial antar permukaan web pada masing-masing piston dengan menggunakan *digital dial indicator*. Data pengukuran pada tiap-tiap titik dikirim dan disimpan dalam perangkat control panel secara nirkabel. Selanjutnya data pengukuran secara lengkap diambil, diolah dan ditampilkan dalam perangkat aplikasi yang dikembangkan sehingga pola defleksi *crankshaft* dapat ditampilkan secara visual. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa ketelitian alat ukur adalah 0,001 mm, dimana nilai tersebut telah memenuhi prasyarat untuk pengujian defleksi *crankshaft* yaitu sebesar 0,12 mm.

Kata kunci: mesin diesel, crankshaft, defleksi, alat ukur

1. Pendahuluan

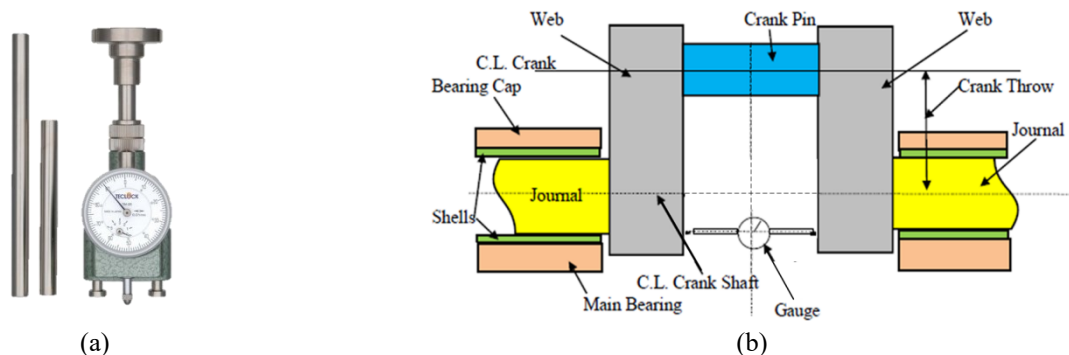
Energi listrik telah menjadi kebutuhan dasar yang harus terpenuhi dalam pola kehidupan saat ini. Berbagai upaya telah dilakukan oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) untuk mempertahankan keandalan produksi energi listrik sekalipun banyak kendala yang dihadapi. Salah satu sistem pembangkitan yang dioperasikan PLN adalah pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Pada beberapa lokasi tertentu, terutama daerah Terdepan, Terluar dan Tertinggal (3T) di Indonesia, PLTD masih menjadi satu-satunya sistem pembangkit atau menjadi penyuplai beban dasar pada sistem hibrid dengan pembangkit listrik energi terbarukan [1].

Salah satu komponen utama PLTD adalah *crankshaft* yang merupakan konstruksi mesin motor bakar yang berfungsi untuk mengubah gerakan translasi piston menjadi gerakan putar utama mesin. Komponen ini merupakan komponen yang vital dimana kerusakan yang terjadi pada *crankshaft* dapat memicu kerusakan sistem mekanis yang ada [2]. *Crankshaft* pada mesin motor bakar ditopang oleh beberapa *journal bearing* yang dapat terdefleksi akibat beban kerja piston [3]. Defleksi tersebut secara langsung akan mempengaruhi gerakan piston yang pada akhirnya berpengaruh pada keseluruhan kinerja mesin [4]. Seiring dengan waktu dan kondisi pengoperasian mesin, kesejajaran *crankshaft* dapat terdeviasi dalam nilai tertentu yang seharusnya tidak boleh melebihi batas standarnya. Ketika nilai deviasi yang terjadi telah melewati batasnya, *crankshaft* dapat mengalami kegagalan ataupun memicu terjadinya kegagalan katastropik [5], [6]. Beberapa penyebab defleksi *crankshaft* antara lain adalah jam operasi yang lebih tinggi dari desain, *alignment* yang

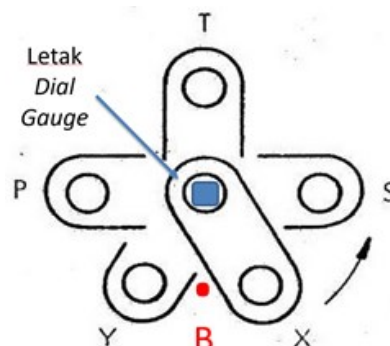
tidak presisi, rendahnya kualitas bahan bakar dan pelumas, adanya cacat material yang menyebabkan pemusatan tegangan dan fatik akibat pembebanan yang tinggi [7].

Pengembangan prosedur pengukuran defleksi *crankshaft* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mencegah gagalnya *crankshaft* pada kondisi operasinya. Untuk meningkatkan keandalan mesin, pengukuran defleksi *crankshaft* yang dapat digunakan sebagai indikator *alignment* pada *crankshaft* perlu diukur secara periodik [8] sehingga dapat diadopsi sebagai salah satu aktivitas dalam pelaksanaan pemeliharaan preventif [3]. Untuk mendukung pola *maintenance* tersebut, prosedur pengukuran defleksi *crankshaft* sebisa mungkin dapat dilakukan dengan mudah dan hasil pengukurannya sesuai dengan tingkat ketelitian yang distandarkan. Salah satu cara untuk menyederhanakan metode pengukuran defleksi *crankshaft* adalah pengukuran yang dapat dilakukan pada kondisi *crankshaft* masih terinstal pada mesin. Namun secara umum metode ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya operator harus masuk ke dalam *bed plate*. Pengukuran defleksi dilakukan dengan menggunakan *dial gauge* seperti ditunjukkan pada Gambar 1a untuk mengukur simpangan aksial beberapa titik pada bidang web seperti ditunjukkan pada Gambar 1b. Kondisi tersebut dapat menyebabkan situasi yang berbahaya terhadap operator serta kondisi yang tidak nyaman dalam lingkungan inferior [9].

Kondisi saat pengukuran, komponen *crankshaft* hanya dibebani oleh massa statis piston, sedangkan dalam kondisi operasi yang sesungguhnya piston memiliki beban kompresi dimana pada mesin diesel beban tersebut relatif tinggi yaitu sekitar 15 hingga 22 [10]. Selain itu, pelaksanaan metode pengukuran tersebut akan mengalami banyak kendala teknis diantaranya aksesibilitas titik pengukuran yang sangat terbatas, kondisi lingkungan yang kurang bersih (terdapat sisa minyak pelumas), serta kondisi bidang referensi pengukuran yang ditentukan oleh keterbatasan konstruksi *crankshaft*. Hal-hal tersebut pada akhirnya berpotensi menurunkan akurasi hasil pengukurannya. Defleksi diukur dari empat posisi pengukuran, tetapi karena tidak dimungkinkannya pengukuran jarak antar web pada posisi bawah, maka simpangan aksial pada titik B digantikan dengan pengukuran simpangan aksial pada dua titik yang berdekatan yaitu posisi X dan Y seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1.a. Alat ukur defleksi *crankshaft* konvensional, b. Pengukuran simpangan aksial sebagai dasar pengukuran defleksi *crankshaft* [11]

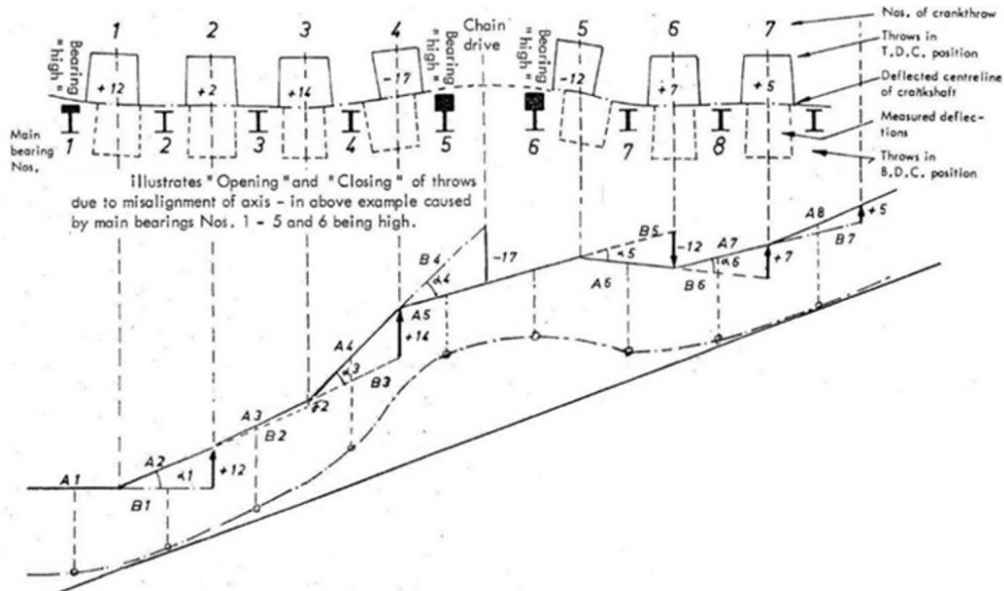


Gambar 2. Posisi pengukuran simpangan aksial antar bidang web pada tiap piston dalam prosedur pengukuran defleksi *crankshaft*.

Berdasarkan data pengukuran yang diperoleh, defleksi arah vertikal dan horisontal *crankshaft* dapat ditentukan dengan persamaan 1 dan 2. Plotting dari seluruh data pengukuran dari suatu mesin yang terdiri dari beberapa silinder akan diperoleh pola defleksi *crankshaft* dalam arah vertikal dan horisontalnya. Orientasi absolut *crankshaft* pada saat pengukuran dilakukan juga dapat dilihat dari kurva pola defleksi tersebut yang ditunjukkan oleh sudut antara garis

singgung kurva defleksi terhadap sumbu horisontalnya. Contoh interpretasi defleksi dan orientasi absolut ditunjukkan dalam Gambar 3[8].

Defleksi horisontal	= P – S(1)
Defleksi vertikal	= T – B(2)
C	= T + B(3)
D	= S + P(4)
Dimana : B	= (X + Y)/2	



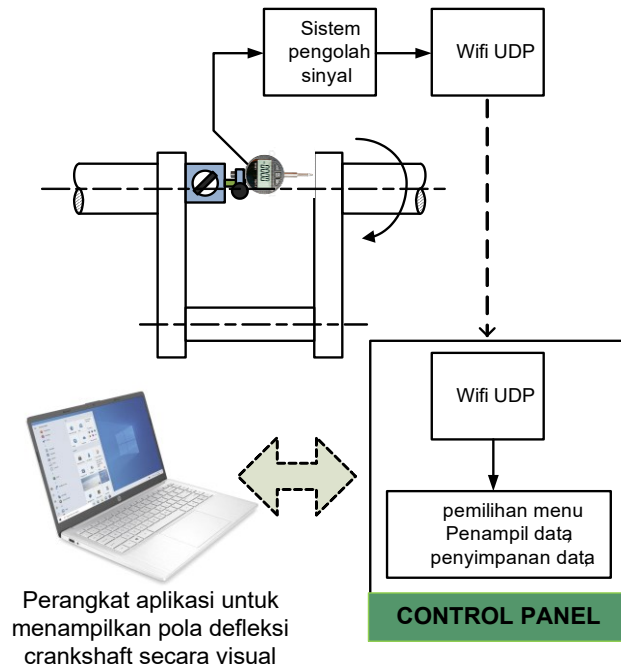
Gambar 3. Contoh pola defleksi *crankshaft* dan orientasi absolutnya yang merupakan *plotting* dari data pengukuran defleksi [12].

Selain ketidaksejajaran dari bearing utama, hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh eksentrisitas bantalan luncur dan atau akibat ketidak-sesumbuan bantalan luncur terhadap bantalan utama. Eksentrisitas bantalan luncur menyebabkan terjadinya celah pada salah satu sisi antara bantalan luncur terhadap dudukannya. Untuk menghilangkan pengaruh tersebut, penentuan pola defleksi *crankshaft* dilakukan dengan memberikan nilai kompensasi terhadap posisi sumbu aktual *crankshaft*. Nilai C dan D pada persamaan 3 dan 4 perlu diperhitungkan, dimana bila selisih antara nilai C dan D terlalu besar, maka pengukuran direkomendasikan untuk diulang.

Pada studi ini dilakukan pengembangan metode pengukuran defleksi *crankshaft* dengan mengganti *dial gauge* yang digunakan. Hasil pengukuran simpangan aksial tiap titik pengukuran secara nirkabel dapat dimonitor dan dicatat dalam sistem memori perangkat dan dengan menggunakan perangkat aplikasi yang dikembangkan secara otomatis hasil pengukuran defleksi dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik. Perhitungan error hasil pengukuran yang mengindikasikan terjadinya ovalitas pada journal bearing juga diakomodir sehingga dari hasil yang ditampilkan dapat diberikan rekomendasi data pengukuran manakah yang harus diulang.

2. Material dan Metode Penelitian

Sistem pengukuran defleksi *crankshaft* yang dikembangkan dengan mengacu cara kerja alat ukur konvensional yang sudah ada. Penambahan fitur dilakukan sehingga hasil pengukuran bisa ditampilkan dalam bentuk pola defleksi *crankshaft* secara visual. Data pengukuran diperoleh dari penggunaan *digital dial indicator* yang diambil melalui sistem port yang ada. Oleh sistem transmiter, data pengukuran tersebut dikirimkan ke sistem *control panel* melalui jaringan WIFI UDP untuk disimpan dalam format tabel pengukuran. Selanjutnya data yang tersimpan dalam *control panel* dapat dipanggil oleh perangkat aplikasi yang dikembangkan untuk ditampilkan dalam bentuk kurva pola defleksi *crankshaft*. Konfigurasi sistem pengukuran ditunjukkan dalam Gambar 4, dengan spesifikasi alat ukur diuraikan dalam Tabel 1.



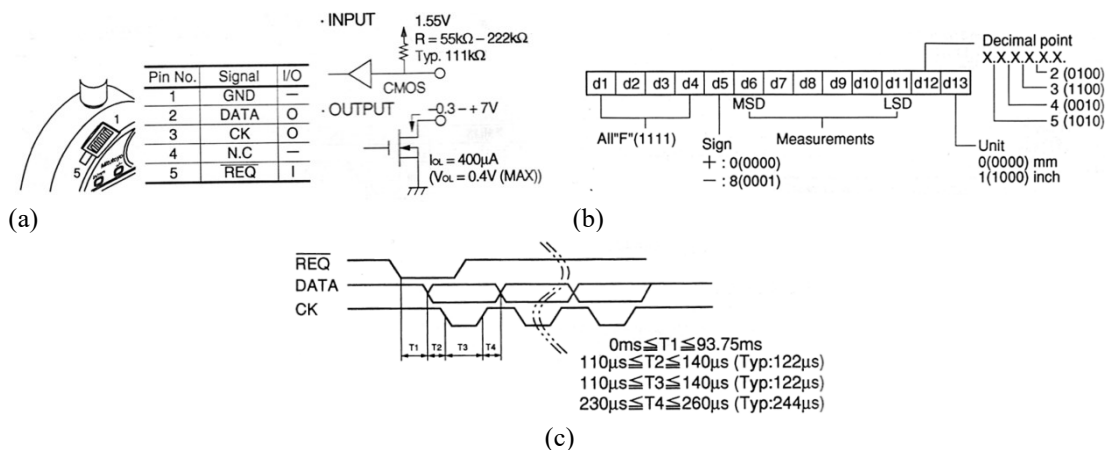
Gambar 4. Konfigurasi sistem pengukuran defleksi crankshaft.

Tabel 1. Spesifikasi desain alat ukur yang dikembangkan

Komponen Sistem Pengukuran	Spesifikasi
Dial indicator	Digital dial indicator, Mitutoyo ID-C125XB, ketelitian 0,001 mm, range pengukuran 0 s/d 26 mm
Sistem transmitter	Mikrokontroler ESP 8266
Control panel	Mikrokontroler ESP 8266
Perangkat aplikasi	Back-end dibangun dengan bahasa Python, front-end dibangun dengan bahasan QML
Pengukuran dengan jumlah piston maksimum	10
Dimensi box transmitter	75x59x22 mm
Dimensi box control panel	102x77x35 mm

2.1 Digital Dial Indicator

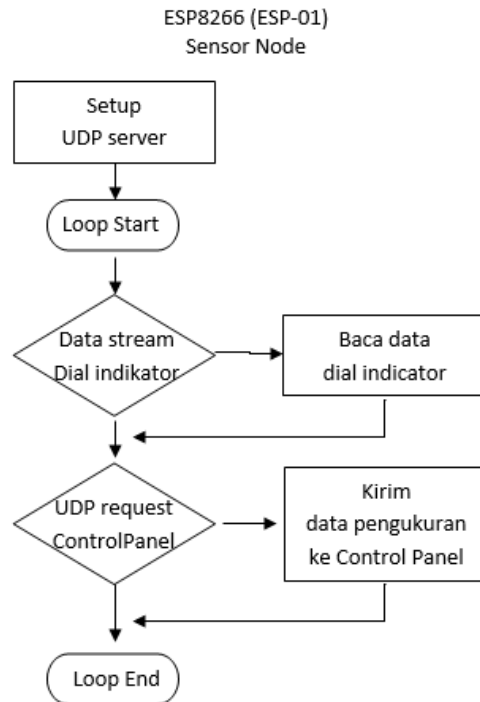
Digital dial indicator digunakan untuk mengukur simpangan aksial antar bidang web pada tiap posisi. Sensor yang digunakan pada dial indicator berupa linear scale encoder. Dengan port yang tersedia, data pengukuran tersebut dapat diambil yang selanjutnya akan dikirim ke control panel melalui sistem transmitter. Konfigurasi pin konektor dan format pengiriman data hasil pengukuran dan diagram waktu pengiriman data seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.



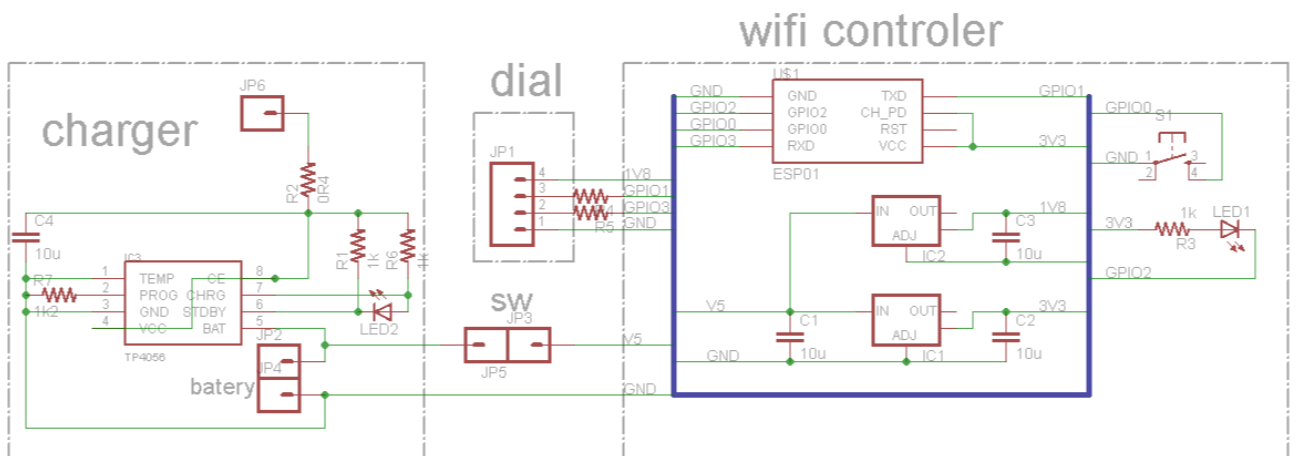
Gambar 5. a. Konfigurasi pin konektor, b. Format pengiriman data pengukuran, c. Diagram pewaktuan proses pengiriman data pada digital dial indicator Mitutoyo ID-C125XB.

2.2 Sistem Transmitter

Sistem *transmitter* berfungsi untuk membaca data hasil pengukuran dalam sistem memori *digital dial indicator* dan selanjutnya data tersebut dikirimkan ke sistem *control panel* menggunakan koneksi wifi UDP. Perangkat ini dirancang menggunakan sebuah mikrokontroler ESP8266 yang dapat terkoneksi dengan wifi [13] dengan fungsi operasinya ditunjukkan dalam diagram alir *embeded alogaritm* Gambar 6, sedangkan Gambar 7 menunjukkan rangkaian perangkat keras sistem transmitter yang dirancang.



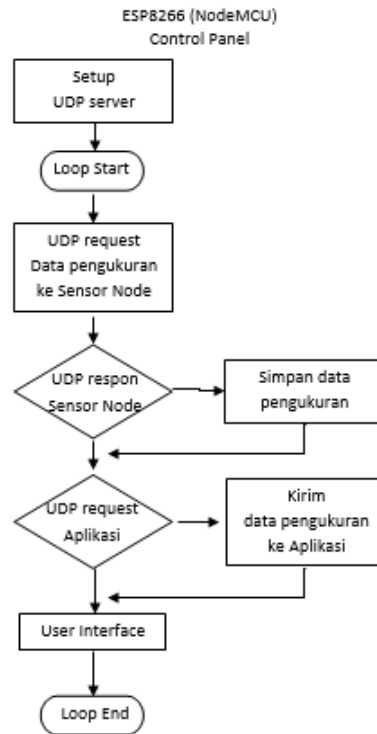
Gambar 6. Algoritma pemrograman tertanam sistem transmitter.



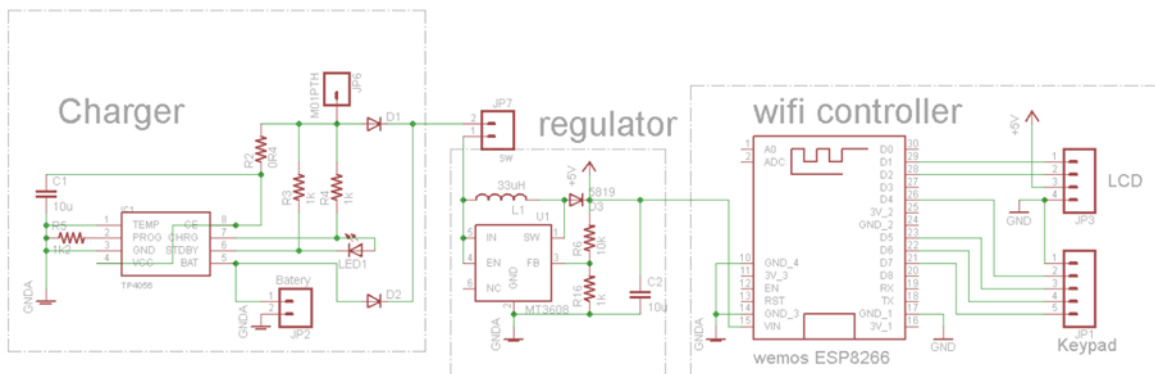
Gambar 7. Rangkaian perangkat keras sistem transmitter.

2.3 Sistem Control Panel

Data yang dikirimkan oleh sistem *transmitter* diterima oleh sistem *control panel* dan data tersebut disimpan dalam format tabel. Selanjutnya atas permintaan perangkat aplikasi, data yang tersimpan dapat dipanggil untuk diolah menjadi bentuk luaran yang dibutuhkan. Sistem *control panel* didesain menggunakan sebuah mikrokontroler ESP 8266 yang dilengkapi dengan layar penampil menu dan data pengukuran yang tersimpan. Gambar 8 menunjukkan diagram alir algoritma tertanam, sedangkan Gambar 9 menunjukkan rangkaian perangkat keras sistem *control panel* yang dirancang.



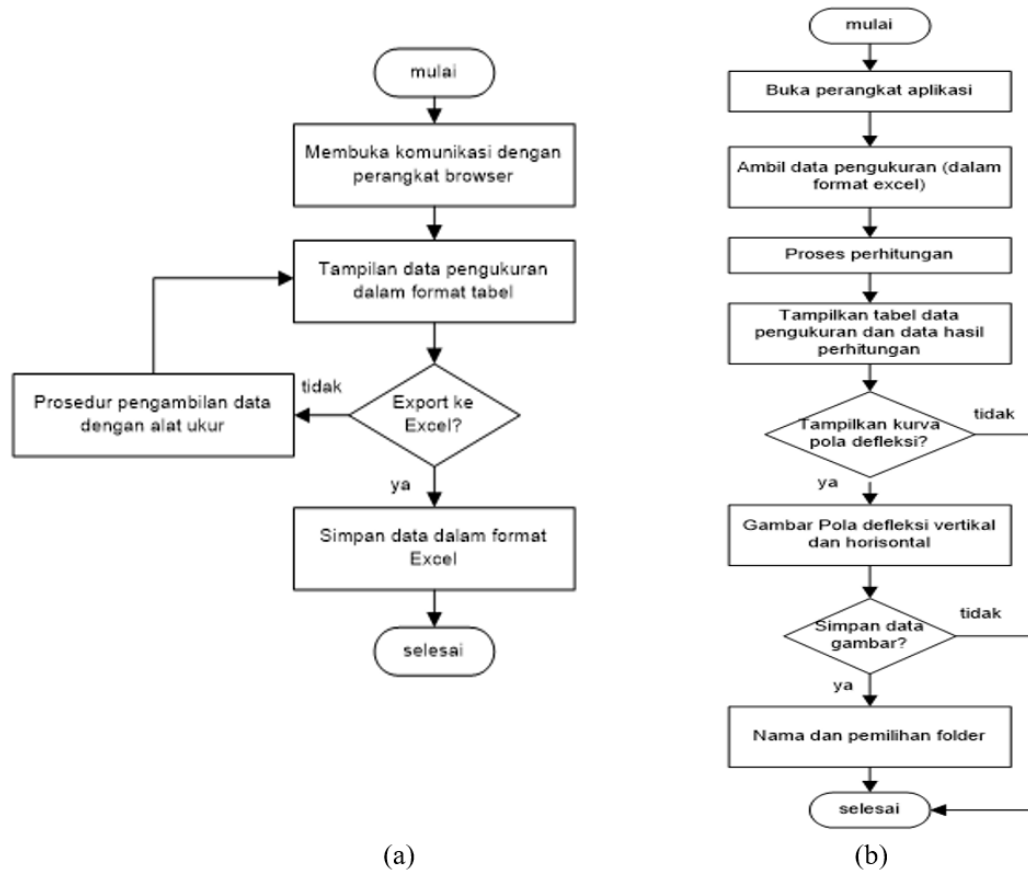
Gambar 8. Diagram alir *embeded alogaritm* sistem control panel



Gambar 9. Diagram Rangkaian perangkat keras sistem control panel.

2.4 Perangkat aplikasi

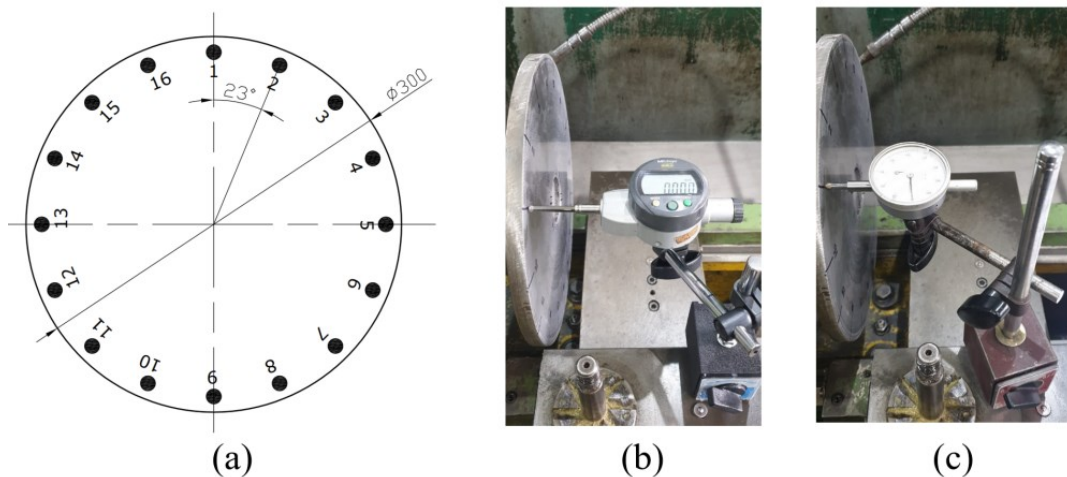
Perangkat aplikasi didesain untuk dapat mengambil data pengukuran yang tersimpan dalam sistem *control panel* maupun secara langsung ketika proses pengukuran dilakukan. Untuk mendukung operasinya, file data pengukuran tersebut harus disimpan dalam file Excel. Metode ini ditujukan agar file data hasil pengukuran selalu dapat disimpan sehingga sewaktu-waktu dapat digunakan sebagai data pembandingan dalam proses analisis yang diperlukan. Pola defleksi *crankshaft* dapat divisualisasikan setelah akses data pengukuran dilakukan dengan mengklik fitur open file yang tersedia. Secara umum terdapat dua tahapan pengoperasian perangkat aplikasi, yaitu tahapan validasi dan penyimpanan data pengukuran serta tahapan pengolahan data dan menampilkan pola defleksinya. Prosedur pengoperasian perangkat aplikasi seperti ditunjukkan dalam diagram blok pada Gambar 10.



Gambar 10. a. Diagram blok proses validasi dan penyimpanan data pengukuran, b. Diagram blok pengolahan data dan tampilan pola defleksi *crankshaft*

3. Hasil dan Pembahasan

Prosedur kalibrasi dilakukan dengan membandingkan antara alat ukur standar, *dial indicator* alat ukur defleksi dan tampilan hasil pengukuran pada layar *control panel*. Kalibrasi dilakukan untuk pengukuran simpangan aksial pada 16 titik ukur pada piringan pengukuran seperti ditunjukkan pada Gambar 11a yang dipasang pada spindel mesin bubut. Perbedaan nilai yang terjadi akan digunakan sebagai nilai kompensasi untuk mengkoreksi nilai pengukuran yang ditampilkan pada layar control panel. Nilai kompensasi kalibrasi digunakan sebagai konstanta pengali pada *embedded algorithm* sistem *control panel*. *Set-up* kalibrasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 11b dan Gambar 11c.



Gambar 11. a. Piringan Pengukuran, b. Pengukuran simpangan aksial dengan digital dial indicator, c. Pengukuran simpangan aksial dengan analog dial indicator.

Hasil pengukuran simpangan aksial dalam proses kalibrasi ditunjukkan dalam Tabel 2, dimana simpangan maksimum sebesar 0,02 mm sebanyak 1 titik, dari 16 titik yang diukur. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa ketelitian alat ukur yang digunakan dalam sistem pengukuran yang dikembangkan memenuhi spesifikasi ketelitian dalam pengukuran defleksi *crankshaft*, yaitu sebesar 0,01 mm.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Simpangan Aksial antara Analog Dial Indicator, Digital Dial Indicator dan Tampilan Layar Sistem Control Panel

JENIS ALAT UKUR	KETELIATAN	POSISI PENGUKURAN																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1
ANALOG DIAL	0,01	0	-0,02	-0,04	-0,06	-0,06	-0,02	0,02	0,05	0,1	0,15	0,15	0,14	0,125	0,11	0,08	0,02	-0,01
DIGITAL DIAL INDICATOR	0,001	0	-0,018	-0,032	-0,062	-0,059	-0,014	0,024	0,051	0,1	0,154	0,151	0,13	0,119	0,13	0,085	0,022	-0,015
CONTROL PANEL	0,001	0	-0,018	-0,032	-0,062	-0,059	-0,014	0,024	0,051	0,1	0,154	0,151	0,13	0,119	0,13	0,085	0,022	-0,015
ERROR MAKSIMUM		0	-0,002	-0,008	0,002	-0,001	-0,006	-0,004	0,001	0	-0,004	-0,001	0,01	0,006	-0,02	-0,005	-0,002	0,005
PEMBULATAN SESUAI KETELIATAN YANG DIBUTUHKAN	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01

Hasil interpretasi pola defleksi *crankshaft* oleh perangkat aplikasi ditunjukkan dengan contoh data hasil pengukuran defleksi *crankshaft* pada Tabel 3, sedangkan tampilan data hasil pengukuran pada perangkat aplikasi ditunjukkan dalam Gambar 12. Dengan mengklik tombol *Export* Tabel, maka data tersebut akan tersimpan dalam file excel. Sesuai dengan prosedur yang ditunjukkan dalam Gambar 10, data pengukuran akan digunakan sebagai parameter masukan dalam perangkat aplikasi dan proses perhitungan akan dilakukan untuk menentukan *plotting* kurva defleksinya.

Tabel 3. Contoh Data Hasil Pengukuran Defleksi *Crankshaft*.

Silinder / Titik Ukur	1	2	3	4	5
X	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
S	-0.01	0.02	0.02	0.00	-0.02
T	-0.04	0.00	0.01	-0.03	-0.06
P	-0.02	-0.01	0.00	-0.03	-0.04
Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Dari data pengukuran yang dimasukkan ke dalam perangkat aplikasi akan ditampilkan tabel data pengukuran dan perhitungan defleksi seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Rekomendasi terkait validitas data yang disebabkan oleh kondisi ovalitas *journal bearing* ditampilkan pada baris paling bawah. Kondisi error yang digunakan sebagai dasar rekomendasi untuk dilakukan perulangan pengukuran bila perbedaan nilai antara C dan D di atas 50%.

Wireless Measurement System

0.00 mm		
Reset Data	Export Tabel	
Piston ke	Posisi Pengukuran	Data
1	X	0.00 mm
	S	-0.01 mm
	T	-0.04 mm
	P	-0.02 mm
	Y	0.00 mm
2	X	0.02 mm
	S	0.02 mm
	T	0.00 mm
	P	-0.01 mm
	Y	0.00 mm
3	X	0.01 mm
	S	0.02 mm
	T	0.01 mm
	P	0.00 mm
	Y	0.00 mm
4	X	0.00 mm
	S	0.00 mm

Gambar 12. Tampilan tabel data pengukuran pada perangkat aplikasi.

DATA PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN DEFLEKSI

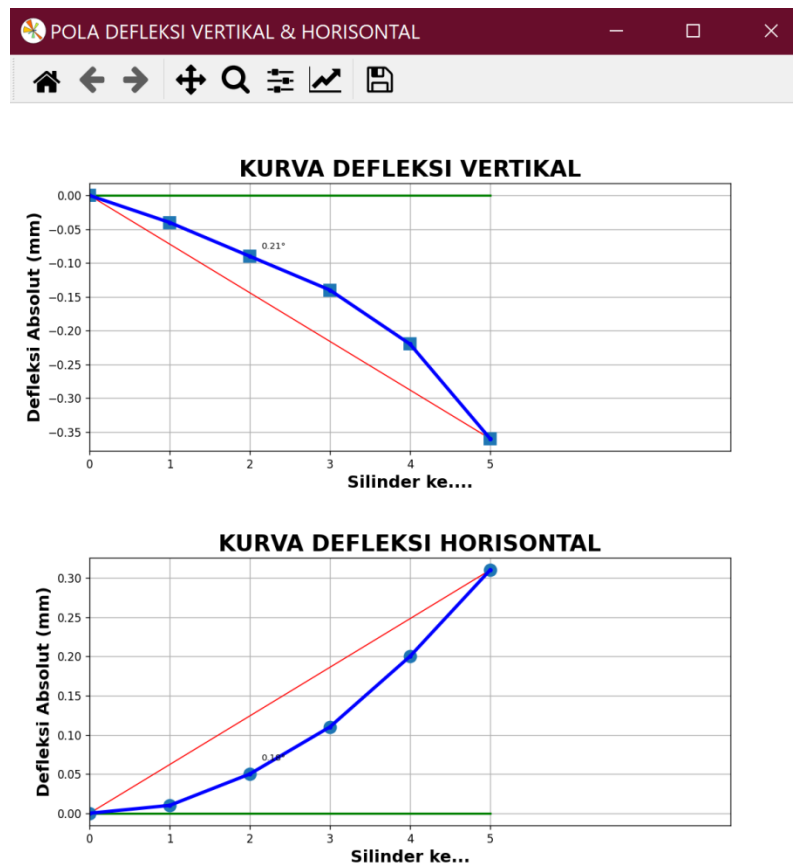
POSISI PISTON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	0 mm	0.02 mm	0.01 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
S	-0.01 mm	0.02 mm	0.02 mm	0 mm	-0.02 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
T	-0.04 mm	0 mm	0.01 mm	-0.03 mm	-0.06 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
P	-0.02 mm	-0.01 mm	0 mm	-0.03 mm	-0.04 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Y	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
B [(X + Y)/2]	0 mm	0.01 mm	0.01 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
H [(S - P)]	0.01 mm	0.03 mm	0.02 mm	0.03 mm	0.02 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
V [(T - B)]	-0.04 mm	-0.01 mm	0 mm	-0.03 mm	-0.06 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
C [(T + B)]	-0.04 mm	0.01 mm	0.02 mm	-0.03 mm	-0.06 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
D [(S + P)]	-0.03 mm	0.01 mm	0.02 mm	-0.03 mm	-0.06 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Error Pengukuran	V	V	V	V	V					

Tanda X: error data terlalu besar sehingga pengukuran harus diulang
Tanda V: error data masih dalam range yang diterima

Rekomendasi pengukuran yang didasarkan pada aspek validitas data

Gambar 13. Tampilan tabel data pengukuran, hasil perhitungan dan rekomendasi berkaitan dengan validitas data pengukuran yang ditampilkan oleh perangkat aplikasi.

Tampilan pola defleksi *crankshaft* dari data pengukuran yang dimasukkan seperti ditunjukkan dalam Gambar 14 yang terdiri dari pola defleksi dalam arah vertikal dan horisontal. Jumlah piston yang ditunjukkan didasarkan pada kelengkapan data pengukuran yang diberikan, sedangkan garis merah menunjukkan pola kemiringan absolut mesin yang diperoleh dengan menghubungkan koordinat 0,0 dengan koordinat akhir dari hasil *plotting* kurva defleksi.



Gambar 14. Pola defleksi *crankshaft* dalam arah vertikal dan horisontal.

4. Kesimpulan

Prototipe alat ukur defleksi *crankshaft* dengan perangkat aplikasi untuk visualisasi pola defleksi telah dikembangkan. Dari hasil kalibrasi ditunjukkan bahwa ketelitian alat ukur adalah 0,001 mm dimana spesifikasi ketelitian yang dibutuhkan adalah 0,01 mm sedangkan untuk pengukuran defleksi *crankshaft* batas maksimal yang dibutuhkan adalah 0,12 mm. Pola defleksi *crankshaft* telah berhasil divisualisasikan baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Dengan menampilkan informasi visual ini diharapkan proses analisis kondisi *crankshaft* dapat dilakukan dengan tepat yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan keandalan operasional mesin diesel sistem pembangkit.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada PT PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan atas dukungan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat dilakukan.

Daftar Pustaka

- [1] PLN, 2021, “Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (Rupli) 2021-2030,” PLN.
- [2] S. Baragetti, 2015, “Design criteria for high power engines crankshafts,” *Open Mech. Eng. J.*, 9(1).
- [3] G. Novac, 2014, “Crank Web Deflections Of Marine Diesel Engines,” *Fiability Durab*: 14.
- [4] M. Fonte, P. Duarte, V. Anes, M. Freitas, dan L. Reis, 2015, “On The Assessment Of Fatigue Life Of Marine Diesel Engine Crankshafts,” *Eng. Fail. Anal.*, 56: 51–57.
- [5] M. Fonte, V. Anes, P. Duarte, L. Reis, dan M. Freitas, 2015, “Crankshaft Failure Analysis Of A Boxer Diesel Motor,” *Eng. Fail. Anal.*, 56: 109–115.
- [6] M. Fonte, P. Duarte, L. Reis, M. Freitas, dan V. Infante, 2015, “Failure Mode Analysis Of Two Crankshafts Of A Single Cylinder Diesel Engine,” *Eng. Fail. Anal.*, 56: 185–193.
- [7] J. Gomes, N. Gaivota, R. F. Martins, dan P. P. Silva, 2018, “Failure Analysis Of Crankshafts Used In Maritime V12 Diesel Engines,” *Eng. Fail. Anal.*, 92: 466–479.
- [8] J. Y. Jang dan M. M. Khonsari, 2016, “On The Relationship Between Journal Misalignment And Web Deflection In Crankshafts,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, 138(12).
- [9] J.-K. Kim dan M.-C. Lee, 2009, “Development Of Wireless Device For Inspecting Crankshaft Deflection Using Linear Encoder,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 26(5).
- [10] Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- [11] Anonymous, 2016, “Engine Crankshaft Deflection Measurement Guide | Iims,” *The International Institute of Marine Surveying (IIMS)*, <https://www.iims.org.uk/engine-crankshaft-deflection-measurement/> (diakses 18 Mei 2022).
- [12] Anonymous, “Diesel Engine Crankshaft Deflection Measurement.” <https://www.linkedin.com/pulse/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/> (diakses 18 Mei 2022).
- [13] P. Paryanto, R. Subarkah, dan R. Rusnaldy, 2022, “Perancangan Prototype Dan Evaluasi Alat Pemantauan Air Limbah Industri Berbasis IoT,” *ROTASI*, 24(1): 50–57.